SCIENCES ET AVENIR
La Recherche

© BERNARD MARTINEZ POUR SETA - AKKMESTERKE/SHUTTERSTOCK

Mission Psyché
À LA CONQUÊTE DES ASTÉROÏDES
p.26

Découvertes Alzheimer Parkinson

et maladies neurodégénératives

avec

Yves Agid

Professeur de neurologie, membre fondateur de l'Institut du cerveau

SCIENCES ET AVENIR / LA RECHERCHE - N° 919 - SEPTEMBRE 2023 - ALZHEIMER, PARKINSON

SEPTEMBRE 2023 - N° 919 - ALLEMAGNE 7,40 € / AUTRICHE 6,50 € / ITALIE 5,70 € / LUXEMBOURG 5,70 € / PORTUGAL 5,70 € / TOM 800 XPF / ILE MAURICE : 8.60€ / TOM (AVION) 1500 XPF / SUISSE 9,50 CHF / TUNISIE 10 TND / MAROC 55 DH / CANADA-USA 8,20 $ / GRÈCE 5,70 € / BELGIQUE 5,70 € / ESPAGNE 5,70 € / ANDORRE 5,40 €

L 13418 - 919 - F: 5,30 € - RD

Révélations sur la « Jérusalem d'Afrique » p.76

hellio

Jusqu'à **60 %** d'économies d'énergie

Baissez vos factures d'électricité en installant des panneaux solaires

Produisez une énergie 100 % renouvelable et locale chez vous grâce au photovoltaïque

Simulez votre projet
particulier.hellio.com
ou au 01 87 66 61 93

Avis Vérifiés™ by Net Reviews
★★★★☆ 4,2/5
sur 4 490 avis

Votre énergie a de l'impact

hellio

Dominique Leglu
Directrice éditoriale

BERNARD MARTINEZ

L'honnêteté d'abord

Experts scientifiques, soyez honnêtes. C'est la qualité que réclament le plus fortement les Français, selon l'édition 2023 du toujours passionnant Baromètre IRSN, qui suit depuis plus de trente ans leur *« perception des risques et de la sécurité »*. Sans oublier — ce serait un comble — l'obligatoire compétence desdits experts scientifiques, deuxième qualité la plus citée par l'échantillon représentatif de 2014 personnes âgées de 18 ans ou plus. Quant à vous, chères lectrices et chers lecteurs de *Sciences et Avenir–La Recherche,* vous ignorez moins que quiconque à quel point il est important de rendre accessibles les connaissances hyper-techniques, ce que revendique à peu près tout le monde.

Information ressentie. De façon générale, les Français s'estiment à 56 % *« mal informés concernant les situations à risque »*. Le baromètre, en pointe sur la formulation de son questionnaire, range cela dans la catégorie de « niveau d'information ressenti ». De quoi faire songer aux annonces météo actuelles, insistant sur la différence entre la température mesurée objectivement par les thermomètres des stations météo et la température ressentie. Le subjectif qui compte. On se demande d'ailleurs dans quel état d'esprit se trouve tout un chacun au sortir de l'été.

Canicules et submersions marines. Il y a de fortes chances pour que le dérèglement climatique continue de caracoler en tête des principales préoccupations environnementales — près de trois fois plus d'ailleurs que n'inquiètent la disparition d'espèces animales et les dommages liés aux catastrophes naturelles, selon le baromètre. Et ce, avec de fortes disparités. Si sept Français sur dix s'estiment bien informés (voire *« très bien informés »*) sur les canicules, ils ne sont plus que quatre pour le risque de submersion marine.

Place de la science. Les experts scientifiques continuent donc d'avoir du pain sur la planche. Bonne nouvelle : objectivité et transparence étant plébiscitées, presque tous les sondés (neuf sur dix) estiment même que les spécialistes *« doivent aussi présenter leurs points de désaccord »*. De quoi faire tendre à nouveau l'oreille aux politiques tentés par les affirmations péremptoires, déjà alertés en août 2022 par un sondage Ifop, selon lequel la majorité des Français considèrent que la science *« n'a pas assez de place »* dans les grands débats de société.

Ni d'accord, ni pas d'accord. Reste à l'expert(e) scientifique, outre à savoir se montrer honnête et transparent(e), à être convaincant(e). Car l'opinion générale à l'égard de la science tient de plus en plus de la réponse de Normand. Si une courte majorité (51 %) estime encore que *« le développement de la science et des technologies génère plus de bénéfices que d'effets néfastes »*, beaucoup (36 %) ne sont *« ni d'accord, ni pas d'accord »* avec cette affirmation. Et ça ne devrait pas s'arranger. En effet, plus les Français sont jeunes, plus ils sont sceptiques : 42 % seulement des 18-24 ans y voient plus de bénéfices. ■ @dominiqueleglu

COURRIER

Courriels à : **courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr**

« Voici le véritable cycle de l'eau »
(*Sciences et Avenir-La Recherche* n° 917-918, juillet-août 2023)

Notre dossier consacré à l'eau a passionné nos lecteurs et a suscité de nombreuses interrogations sur son cycle, un schéma qui inclut les activités humaines dans les flux hydrologiques mondiaux. Voici une sélection des principales demandes de précisions et les réponses de notre spécialiste Loïc Chauveau.

▸ La quantité d'eau terrestre est-elle fixe sur la durée ? Si oui, le schéma se doit d'être équilibré entre les entrées et les sorties.

S. et A. : Oui, la quantité d'eau sur Terre est fixe sur la durée (avec un volume total d'eau à la surface d'environ 1,4 milliard de km³).

▸ Les nappes souterraines se rechargent à hauteur de 13 000 km³ par an et se vidangent à hauteur de 8500 km³ (pompages et rejets directs). Pourtant n'est-il pas commun de lire que ces nappes ont tendance à baisser ?

S. et A. : Cela dépend de leur profondeur et de leur situation. Ce sont les nappes exploitées — les plus faciles d'accès — qui baissent. Dans certaines parties du monde, les nappes continuent d'augmenter du fait de la faiblesse de l'activité humaine soit industrielle, soit agricole. C'est le cas de l'Afrique subsaharienne.

▸ Les mers perdent 420 000 km³ par évaporation et en récupèrent un total de 435 000 km³. Est-ce que ce sont ces 10 500 km³ de différence qui provoquent la montée du niveau de la mer ?

S. et A. : Dans votre calcul, vous oubliez les flux atmosphériques des mers vers les terres, soit 46 000 km³, qui s'équilibrent avec les 46 000 km³ d'apport des fleuves aux mers. Les apports des nappes souterraines (4500 km³) sont très mal estimés, d'où une marge d'erreur de 70 %. Ce bilan n'est donc pas responsable de la montée du niveau des mers, qui provient de la fonte des glaciers terrestres et de la dilatation de l'eau.

▸ Que deviennent les 19 000 km³ des usages agricoles ?

S. et A. : Ils partent en évapotranspiration des plantes et s'ajoutent aux 69 000 km³ d'évapotranspiration terrestre (milieux naturels ainsi qu'agriculture et prairies).

▸ Vous ne mentionnez jamais la navigation fluviale, tout spécialement les canaux. Or ces derniers consomment un sixième de l'eau douce en France. Dans quelle rubrique mettez-vous cette consommation ?

S. et A. : Cette eau n'est pas consommée, mais simplement retenue pour maintenir un niveau d'eau suffisant pour la navigation. Que ce soit sec en fin d'été est normal, puisque l'eau captée dans les lacs l'hiver est relâchée petit à petit au cours de l'été. C'est ainsi que fonctionnent aussi (à une échelle autrement plus importante) les quatre « grands lacs de Seine », qui maintiennent un débit constant du fleuve dans la capitale. Sans eux, on pourrait quasiment traverser la Seine à gué à Paris lors des étés très secs. De même, de grandes retenues d'eau servent à maintenir un débit constant pour le refroidissement de certaines centrales nucléaires, comme le lac de Vassivière en Haute-Vienne qui sert à maintenir le niveau de la Vienne pour la centrale nucléaire de Civaux.

Précisions

Dans l'article sur Le cycle de l'eau (p. 43), il fallait lire que les précipitations au-dessus des océans sont trois fois (et non huit fois) plus importantes que celles qui se forment sur les continents.

Dans l'infographie sur « L'eau dans le monde et en France » (p. 40), le graphique sur l'eau disponible globalement par an et par habitant est mal libellé : on parle de stress hydrique lorsque les ressources sont inférieures (et non supérieures) à 1700 m³.

BERNARD MARTINEZ

ÉDITO

Mathieu Nowak
Rédacteur en chef

Espoirs inédits

« *Nous savons aujourd'hui qu'il est possible de ralentir la neurodégénérescence et, espérons-le, de la stopper dans un avenir proche* », nous dit Maria Carrillo *(p. 58)*, docteure en neurosciences, à la tête de l'Alzheimer's Association, la première organisation de santé bénévole au monde consacrée aux soins, au soutien et à la recherche sur la maladie d'Alzheimer. Après tant d'années de doutes, d'errances et de déceptions, commencerait-on à écrire un nouveau chapitre, plus optimiste, de l'histoire de la prise en charge des maladies neurodégénératives, en premier lieu Alzheimer et Parkinson ? C'est en tout cas ce que suggère la grande enquête que nous vous proposons ce mois-ci. Il faut dire qu'il n'est pas difficile de progresser : jusqu'à présent, les médecins n'avaient tout simplement aucun médicament efficace pour soigner les malades d'Alzheimer et le traitement de référence de Parkinson, qui remonte aux années 1960, perd en efficacité dans le temps. La nouvelle de la commercialisation — pour l'heure aux États-Unis — de deux médicaments et bientôt d'un troisième ralentissant le développement d'Alzheimer est porteuse d'espoir *(p. 52)*. Surtout qu'elle valide l'idée de s'attaquer aux amas protéiques qui s'accumulent dans le cerveau des malades. Jusqu'à présent, cette approche n'avait pas permis de constater d'amélioration dans le quotidien des patients. Au point que les chercheurs étaient en passe de l'abandonner. Aujourd'hui, 150 traitements font l'objet de tests. L'espoir est donc bien là. Reste que pour le neurologue Yves Agid, *« nous devons envisager la recherche sous d'autres angles » (p. 56)* afin d'aller plus loin. Démarche qui, justement, a déjà été adoptée pour Parkinson. Cinq approches radicalement nouvelles que nous vous détaillons *(p. 60)* sont en cours d'évaluation. En particulier, l'injection directe de la dopamine manquante dans le cerveau a permis, dans un essai français conduit à Lille, d'obtenir une quasi-disparition des mouvements involontaires ! En attendant, soigner sa forme et entretenir son cerveau restent les clés de la prévention. Que la lecture de votre magazine préféré vous soit donc bénéfique en plus d'être agréable ! ■ @mathieu_nowak

> « 150 médicaments font actuellement l'objet de tests dans la maladie d'Alzheimer »

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

SERVICE ABONNEMENT
et anciens numéros
Tél. : 01.55.56.71.48
Sciences et Avenir 45, avenue du Général-Leclerc 60643 Chantilly cedex
abonnements@sciencesetavenir.fr

Tarif des abonnements : France, 1 an simple (11 numéros dont un double) : 35 € 1 an complet (11 numéros dont un double + 4 hors-séries) : 48 €. Étranger : nous consulter.
Abonnements Belgique : Edigroup : tél. 00.32.70.233. 304
Abonnements Suisse : Edigroup : tél. 00.41.22.860.84.01

Pour joindre la rédaction :
41 bis, avenue Bosquet 75007 Paris
Tél. : 01.55.35.56.01.
E-mail : redaction@sciencesetavenir.fr
Site Internet : sciencesetavenir.fr

Directrice éditoriale Dominique LEGLU - 01.55.35.56.02
Rédacteur en chef Sciences et Avenir Mathieu NOWAK 01.55.35.56.38
Rédacteur en chef La Recherche Philippe PAJOT - 01.70.98.19.29
Rédacteur en chef digital Olivier LASCAR - 01.55.35.56.15

Rédaction en chef hors-série Vincent REA - 01.55.35.56.35
avec Florence LEROY - 01. 55.35.56.36
Adjoint à la rédaction en chef
Laurent PERICONE (édition) - 01.55.35.56.10
Rédacteur(trice)s en chef adjoint(e)s
Vincent GLAVIEUX (La Recherche) - 01.70.98.19.32
Hugo JALINIÈRE (Sciences et Avenir) - 01.55.35.56.52
Andreina DE BEI (photo) - 01.55.35.56.31
Lise LOUMÉ (digital) - 01.55.35.56.39
Directeur(trice)s artistiques
Dominique PASQUET (couverture) - 01.55.35.56.59
Jean-Louis GILABERT - 01.55.35.56.28
Thalia STANLEY (adjointe) - 01.55.35.56.21
Secrétaire générale de la rédaction
Véronique MESSAGER - 01.55.35.56.18
Conseillère auprès de la rédaction en chef
Rachel MULOT (cheffe de service enquêtes) - 01.55.35.56.07
Chef de service Fabrice NICOT (fondamental) - 01.55.35.56.46
Chef de service adjoint Hervé RATEL (actualités) - 01.55.35.56.45
Chef(fe)s de rubrique
Franck DANINOS (fondamental) - 01.55.35.56.78
Mathias GERMAIN (biologie, médecine, santé) - 01.70.98.19.33
Sylvie RIOU-MILLIOT (médecine, santé) - 01.55.35.56.54
Rédaction Marine BENOIT (archéologie, histoire) - 01.55.35.56.23
Arnaud DEVILLARD (numérique, expositions) - 01.55.35.56.27
Sylvie ROUAT (grand reporteure, espace, océanologie) - 01.55.35.56.40
Assistante de direction Valérie PELLETIER - 01.55.35.56.01
Collaborateurs(trices) Bernadette ARNAUD, Sylvie BOISTARD, Loïc CHAUVEAU, Johan KIEKEN
Chroniqueurs Sylvie BENZONI, Christophe CASSOU, Jean-Gabriel GANASCIA, Céline GUIVARCH, CLAIRE MATHIEU
Ont participé à ce numéro P. BERLOQUIN, A. CARLIEZ, C. COUMAU, F. COSTES, M. DA PONTE, N. GUTIERREZ C., M. JULIEN, P. KALDY, M. PARRA
1re secrétaire de rédaction Sandrine HAGÈGE - 01.55.35.56.17
Photo-iconographie Isabelle TIRANT - 01.55.35.56.32
Claire BALLADUR - 01.70.98.19.41
Pôle digital Valentin COLLIAT-DANGUS (community manager) - 01.55.35.56.70, Isabelle DO O'GOMES (cheffe de rubrique, veille) - 01.55.35.56.49, Camille GAUBERT (santé) - 01.55.35.56.24, Joël IGNASSE (espace, paléontologie) - 01.55.35.56.15, Coralie LEMKE (santé) - 01.55.35.56.56, Astrid SAINT AUGUSTE (rédactrice spécialisée) - 01.55.35.56.48, Anne-Sophie TASSART (cheffe de rubrique) - 01.55.35.56.41
Clémence BAUDOUIN directrice numérique déléguée - Jessica RIOS responsable projets digitaux - Yann BOURDAIS chef de projet junior - Flora ISSINGUI cheffe de projet marketing digital
Courrier des lecteurs
Sara DE LACERDA - courrier-lecteurs@sciencesetavenir.fr
Informatique Daniel DE LA REBERDIÈRE - 01.55.35.56.06
Responsable administrative et financière Jaye REIG - jreig@challenges.fr
Comptabilité - compta@challenges.fr
Responsable ressources humaines Mélanie HENOU - mhenou@challenges.fr
Responsable paye Sandrine MARTIN - smartin@challenges.fr
Fabrication Sarah RABBAH
Publicité MediaObs 44, rue Notre-Dame-des-Victoires 75002 Paris Tél. : 01.44.88.97.70. Fax : 01.44.88.97.79.
Courriel : l'initiale du prénom puis nom suivi de @mediaobs.com
Directrice générale Corinne ROUGÉ - 01.44.88.93.70 - assistée de Marie-Noëlle MAGGI - 01.44.88.93.70
Directeur de publicité Emmanuel LALA - 01.44.88.89.28
Exécution : Emilien RIGNOLS - 01.44.88.89.05
Administration des ventes Catherine FERNANDES - 01.44.88.89.20
Directeur commercial Valéry SOURIEAU
Directeur des abonnements Luc BONARDI
Responsable des abonnements Lina QUACH - 01.55.35.56.63

Les Éditions Croque Futur
Président, directeur de la publication Claude PERDRIEL
Directeur général Philippe MENAT
Directeur éditorial Maurice SZAFRAN
Secrétaire général Jean-Claude ROSSIGNOL

Origine du papier : Allemagne - Taux de fibres recyclées : 0 %
Eutrophisation : PTot = 0,018 kg/tonne de papier
Ce magazine est imprimé chez Roto France (Lognes), certifié PEFC

Certifié PEFC
Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.
PEFC 10-31-1557 pefc-france.org

FR

ACPM DIFFUSION

Les noms et adresses de nos abonnés seront communiqués aux organismes liés contractuellement avec *Sciences et Avenir*, sauf opposition. Dans ce cas, la communication sera limitée au service de l'abonnement. Ce numéro comporte un message « Challenges », un encart « Montre Chronographe Monte Carlo – Vuillemin Regnier-Sophia Boutique » ainsi qu'une lettre de « bienvenue aux abonnés » jetés sur couverture sur une partie de la diffusion abonnés ; un encart « Sciences et Avenir L'Océan » jeté sur couverture sur la totalité de la diffusion abonnés. Commission paritaire n° 0625 K 79712. ISSN 00368636. Distribué par MLP.

LIMICOL®

L'EFFICACITÉ PROUVÉE CONTRE LE CHOLESTÉROL

BÉNÉFICE SANTÉ VALIDÉ par les autorités européennes

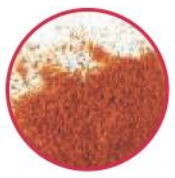
Le **premier et le seul** complément alimentaire pour **réduire le cholestérol** ayant obtenu une allégation de santé exclusive par l'Union Européenne.

PROUVÉ CLINIQUEMENT

-20%

DE LDL-CHOLESTÉROL DÈS 1 MOIS[1]

COMPLEXE BREVETÉ À BASE D'ACTIFS **D'ORIGINE NATURELLE** ET VITAMINES


Levure de riz rouge

Extrait d'ail

Extrait d'artichaut

Scannez pour en savoir plus sur Limicol et comment réduire votre cholestérol.

Vous avez des questions ?

Contactez notre service client au **05 46 56 30 48**

Consultez notre site : **laboratoire-lescuyer.com**

Ou rendez-vous sur nos **réseaux sociaux**

FORMULATION ET FABRICATION FRANÇAISES

LABORATOIRE LESCUYER
La micronutrition source de santé

Complément alimentaire. Ne se substitue pas à une alimentation variée, équilibrée et à un mode de vie sain. *La combinaison d'actifs de Limicol® réduit les concentrations de cholestérol LDL dans le sang. Une cholestérolémie LDL élevée constitue un facteur de risque dans le développement des maladies coronariennes. Il existe d'autres facteurs de risque qu'il est également important de surveiller. La modification de l'un de ces facteurs peut ou non avoir un effet bénéfique. Ce produit est destiné aux personnes devant contrôler leur taux de cholestérol sanguin. 1 - Réduction moyenne observée lors de 3 études cliniques réalisées sur un total de 184 sujets âgés de 18 à 65 ans, présentant une hypercholestérolémie non traitée : Ogier et al. Eur J Nutr 2013 ; Barrat et al. Int J Food Sci Nutr. 2013 ; Barrat et al. Eur J Nutr 2013

POUR VOTRE SANTÉ, PRATIQUEZ UNE ACTIVITÉ PHYSIQUE RÉGULIÈRE

SOMMAIRE

Sciences et Avenir - La Recherche / N° 919 / Septembre 2023

DOSSIER P. 50

ALZHEIMER - PARKINSON

Le retour des thérapies innovantes

De nouveaux traitements laissent espérer une réduction du déclin cognitif de la maladie d'Alzheimer et des thérapies plus ciblées améliorent les symptômes pour Parkinson. Mais il faut voir encore plus loin, encourage le neurologue Yves Agid.

P. 26

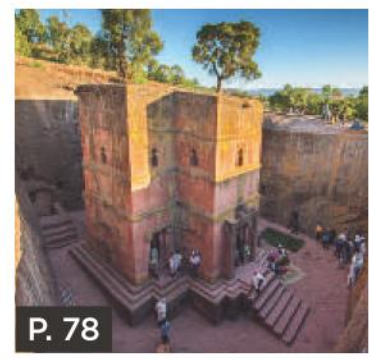
Mission Psyché : la ruée vers l'or des astéroïdes

En octobre, une mission inédite va partir pour évaluer la possibilité d'exploiter les richesses minières d'un astéroïde. Enquête sur cette nouvelle ruée vers l'or.

P. 40

Insectes : aux sources de leur vertigineux déclin

Destruction des habitats, pesticides, changement climatique... Les insectes sont soumis à rude épreuve. Les programmes de science participative se multiplient pour prévenir leur disparition.



P. 78

Révélations sur la Jérusalem éthiopienne

De nouvelles fouilles autour des fameuses églises monolithes permettent de reconstituer peu à peu l'histoire de ce site bien plus ancien qu'on ne le pensait. Reportage à Lalibela.

3 **Éditorial** par Dominique Leglu

4 **Courrier**

5 **Édito** par Mathieu Nowak

SCIENCES FONDAMENTALES

8 **ACTUALITÉS** Matière extraterrestre en vue / Un supercondensateur en béton

26 **Mission Psyché : les richesses très convoitées des astéroïdes**

31 **La centrale solaire spatiale sort de l'ombre**

34 **Les robots mous explorent le corps humain**

38 **Entretien avec l'astrophysicienne Athena Coustenis**

NATURE

12 **ACTUALITÉS** Un sursis pour les fonds marins / La dune grise en voie de disparition

40 **Insectes : aux sources de leur vertigineux déclin**

45 **Parthénogenèse : quand les femelles se suffisent à elles-mêmes**

48 **Un été 2021 bien plus chaud que durant l'optimum médiéval**

SANTÉ

16 **ACTUALITÉS** Le génome minimal a évolué ! / Sida : une étrange rémission

66 **Virus : pourquoi ils détraquent l'immunité**

71 **Modifier les bactéries pour en faire des médicaments**

74 **Nutrition : les bienfaits de la poire**

HISTOIRE

20 **ACTUALITÉS** La généalogie reconstituée de familles du néolithique / Un dinosaure croqué par un petit mammifère

78 **Révélations sur la Jérusalem éthiopienne**

82 **Neandertal, artiste malgré lui**

TRANSVERSALES

90 **Sélection livres**

92 **Expositions**

93 **Le ciel de septembre**

94 **Chroniques**
Climat par Céline Guivarch et Christophe Cassou / Mathématiques par Sylvie Benzoni / Éthique par Jean-Gabriel Ganascia / L'œil d'Olivier Lascar

96 **Questions de lecteurs**

98 **Jeux**

AMELIE-BENOIST / IMAGE POINT FR / BSIP - 24K-PRODUCTION/SHUTTERSTOCK - PATRICK LANDMANN/SPL/SUCRÉ SALÉ - ALAMY / HEMIS.FR

JAMES BLAIR/NASA

L'équipe scientifique du centre spatial de Houston (Etats-Unis) aura pour délicate mission d'ouvrir la capsule des échantillons sans les contaminer.

Matière extraterrestre en vue

250 grammes d'échantillons de poussières et de roches prélevés sur l'astéroïde Bénou par la sonde Osiris-Rex de la Nasa vont être récupérés sur Terre.

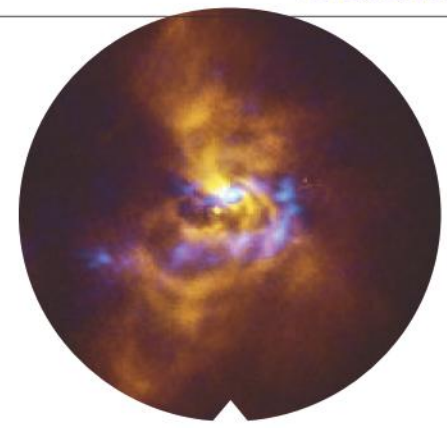
Après un voyage de près de sept ans dans l'espace, la sonde de la Nasa Osiris-Rex s'apprête à revenir sur Terre avec sa précieuse cargaison : quelque 250 grammes d'échantillons de poussières et de roches prélevés directement sur l'astéroïde Bénou, à plus de 300 millions de kilomètres de notre planète. Riche en minéraux hydratés et en molécules organiques, cet objet rocheux de type carboné, d'environ 500 mètres de diamètre, est censé refléter la composition du Système solaire tel qu'il s'est constitué il y a 4,6 milliards d'années. « *Ces échantillons devraient fournir un aperçu du rôle que des astéroïdes similaires ont joué dans la formation des planètes et dans l'apport de matière organique et d'eau à la Terre, ayant conduit à la vie* », précise la Nasa. Selon l'agence spatiale américaine, les données collectées aideront aussi « *à mieux comprendre les astéroïdes qui pourraient entrer en collision avec notre planète et préparer les futurs efforts visant à les dévier* ».

Un laboratoire construit spécialement

Lors du retour sur Terre programmé le 24 septembre, la capsule contenant les échantillons sera larguée par la sonde Osiris-Rex quatre heures avant d'atteindre le sol. Le vaisseau, lui, poursuivra son périple vers un autre géocroiseur, Apophis, qu'il étudiera en 2029 lorsque celui-ci « frôlera » notre planète à seulement 10 % de la distance Terre-Lune. À une centaine de kilomètres de Salt Lake City, dans le Polygone de test où l'armée américaine de l'Utah évalue habituellement de nouveaux systèmes d'armes, un hélicoptère récupérera la capsule de 46 kg et 81 cm de diamètre pour l'apporter au centre spatial Johnson de la Nasa à Houston (Texas). C'est là, dans un laboratoire flambant neuf, spécialement construit pour l'occasion, que seront préservés et manipulés les précieux échantillons. « *L'équipe de conservation d'Osiris-Rex se prépare avec enthousiasme à récupérer les échantillons de Bénou* », a précisé la géochimiste Nicole Lunning, qui sera en charge de ces travaux. Et de la première opération délicate : ouvrir la capsule sans contaminer les échantillons avec des substances terrestres. Ce n'est pas la première fois que de la matière astéroïdale est recueillie dans l'espace pour être analysée sur Terre. Mais les 250 g collectés par Osiris-Rex sont sans commune mesure avec les quelques millionièmes de gramme de l'astéroïde silicaté Itokawa rapportés en 2010 par le vaisseau japonais Hayabusa, ou les 5,4 g récupérés par son successeur Hayabusa-2 en 2020 sur l'astéroïde carboné Ryugu. **F. D.**

Aux origines des géantes gazeuses

La formation par effondrement gravitationnel de ces planètes vient d'être observée.



Des amas de matière entourent ici la jeune étoile V960 Mon.

ESO/ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/WEBER ET AL.

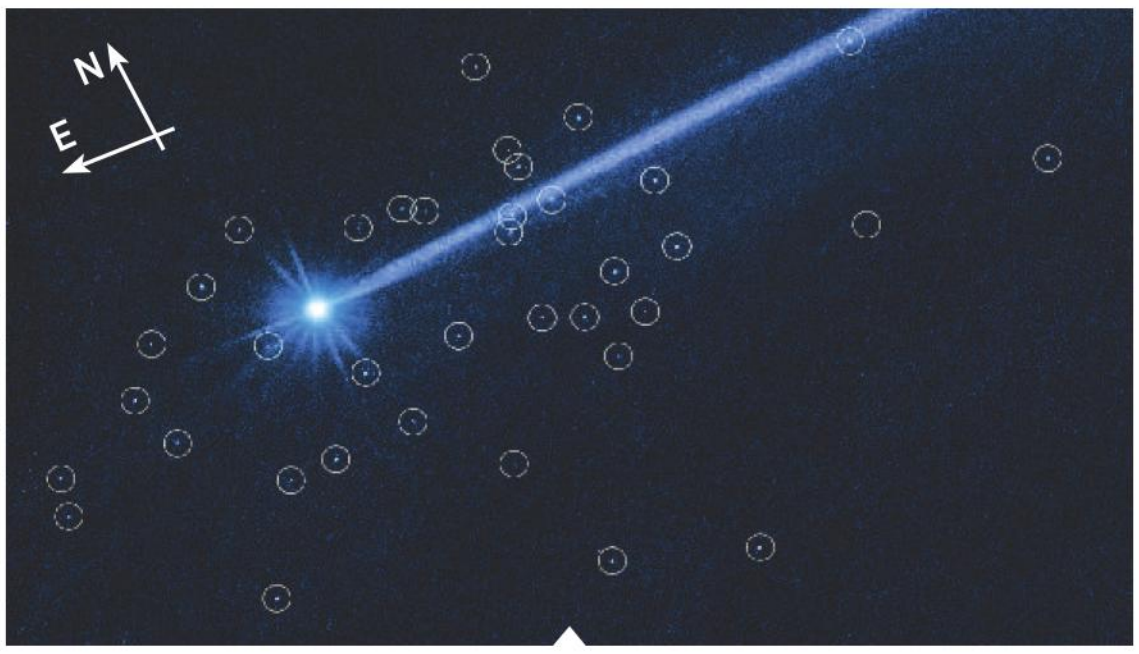
Pour la première fois, des chercheurs ont observé la naissance de planètes géantes gazeuses par effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz et de poussières. À 5000 années-lumière de nous, l'instrument Sphere du Very Large Telescope et le radiotélescope Alma au Chili ont détecté la présence dans ce gaz de « grumeaux », des amas lumineux de matière, témoins de géantes en formation. Jusqu'ici, seul le modèle par accrétion, où le gaz s'agrège autour d'un noyau rocheux, avait été observé. « *Mais il ne rend pas compte de la formation de ces géantes situées très loin de leur étoile,* explique Jean-Luc Beuzit, directeur de l'Observatoire des sciences de l'Univers-institut Pythéas (université Aix-Marseille-CNRS). *Seul le modèle par effondrement gravitationnel le permet, mais il n'avait jamais été vu avant ce magnifique résultat.* » **F. N.**

Euclid part à l'assaut de la matière noire

ASTROPHYSIQUE Les premières images du satellite Euclid, lancé avec succès le 1er juillet, ont été révélées par l'Agence spatiale européenne. Certaines sont brouillées par un excès de lumière dû à une petite ouverture laissant filtrer les rayons du Soleil. Mais le défaut ne devrait pas nuire à sa mission : étudier l'expansion de l'Univers des dix derniers milliards d'années et la distribution de la mystérieuse matière noire. **J. I.**

EN DEUX MOTS

FUSÉE Après 27 ans de bons et loyaux services, le lanceur spatial Ariane 5 a effectué son 117e et dernier vol le 5 juillet, le premier décollage d'Ariane 6 étant espéré pour début 2024. **EXOGÉOLOGIE** Une équipe américaine annonce avoir détecté un énorme morceau de granite de 50 km de large enfoui sous la surface lunaire. **HIGH-TECH** Meta (ex-Facebook) et Microsoft ont présenté la nouvelle génération de leur grand modèle de langage Llama2, gratuit et open source, qui doit concurrencer les solutions de Google et OpenAI.



NASA/ESA/D. JEWITT (UCLA)/A. PAGAN (STSCI)

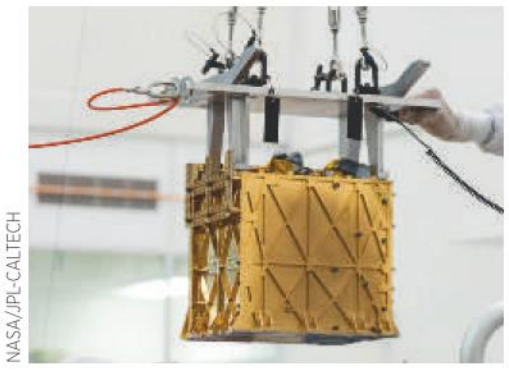
L'astéroïde percuté par la sonde Dart file escorté de 37 débris expulsés lors de l'impact.

Un nuage de roches autour de Dimorphos

ESPACE Percuté en septembre 2022 par la sonde Dart pour le premier essai — réussi — de déviation d'un astéroïde, Dimorphos file désormais escorté par 37 rochers expulsés au moment de l'impact. Mesurant entre 1 et 6,7 mètres de large, ces débris qui s'éloignent de l'astéroïde à une vitesse d'environ 1 kilomètre par heure comptent parmi les objets les plus insaisissables révélés par le célèbre télescope spatial Hubble. Une telle observation offre des informations inestimables sur le comportement d'un petit astéroïde lorsqu'il est frappé par un projectile dans le but de modifier sa trajectoire. **H. J.**

Perseverance produit de l'oxygène martien

CHIMIE L'instrument Moxie qui équipe le rover martien Perseverance a réussi à produire 12 g d'oxygène en 58 minutes, soit deux fois plus que lors des précédents tests. De quoi permettre à un astronaute de respirer durant une vingtaine de minutes. Moxie filtre l'atmosphère de Mars — 100 fois moins dense que sur Terre — avant de comprimer et chauffer l'air pour décomposer le dioxyde de carbone (CO_2) obtenu en oxygène (O_2) et en monoxyde de carbone (CO). La Nasa réfléchit déjà à une version plus sophistiquée qui produirait *« 2000 à 3000 g d'oxygène à l'heure »* pour alimenter un équipage pendant les 26 mois que durerait une mission habitée sur Mars. **F. D.**



NASA/JPL-CALTECH

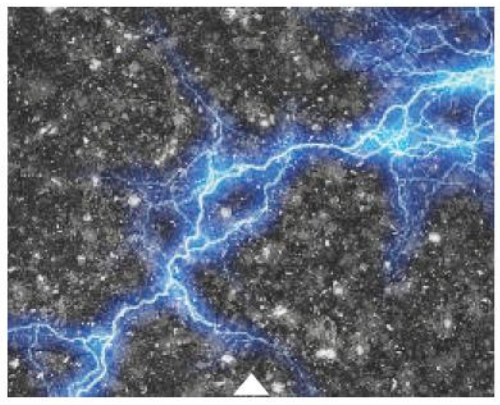
◀ **L'instrument Moxie** pèse 17 kg pour 30 cm de large.

Découverte de la molécule la plus recherchée de l'Univers

ASTROPHYSIQUE C'est par hasard, alors qu'il scrutait la nébuleuse d'Orion à 1350 années-lumière de la Terre, que le télescope spatial James-Webb a identifié la molécule la plus recherchée dans l'Univers : le cation méthyl ($CH3^+$). « *Il nous a fallu quelques semaines pour comprendre qu'il s'agissait du fameux cation méthyl, que tout le monde recherche depuis les années 1970 !* », s'exclame son codécouvreur Olivier Berné. De par sa faculté à se lier avec un grand nombre de molécules organiques pour en former de plus complexes, le cation méthyl est considéré comme la pierre angulaire de la chimie interstellaire. Ne pas le trouver, c'était un peu comme posséder une collection d'objets réalisés en Lego, sans avoir jamais vu une brique individuelle. Désormais, l'identification de cette molécule censée se trouver partout ne devra plus rien au hasard. **F. N.**

SOURCE : OLIVIER BERNÉ, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, FRANCE.

Un supercondensateur en béton



FRANZ-JOSEF ULMET AL.

Ce ciment électrifié pourrait permettre de stocker l'énergie à faible coût (vue d'artiste).

MATÉRIAU En combinant du ciment et du noir de carbone avec de l'eau, des ingénieurs ont conçu un matériau qui pourrait être à la base d'un nouveau système de stockage d'énergie. Intégré aux fondations en béton d'un bâtiment, ce supercondensateur à faible coût permettrait d'emmagasiner l'énergie produite par des panneaux solaires ou des éoliennes pour l'utiliser quand c'est nécessaire. Les chercheurs envisagent même qu'une chaussée en béton puisse fournir une recharge sans contact aux voitures électriques lorsqu'elles circulent sur cette route. **H. J.**

SOURCE : NICOLAS CHANUT, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, ÉTATS-UNIS.

CALTECH CAST

À VOIR SUR LE NET

Morphobot, huit robots en un

HIGH-TECH Voler, rouler, ramper, marcher sur quatre pattes ou se tenir debout sur deux… Il sait tout faire, ou presque. Le M4, ou Multi-Modal Mobility Morphobot, est un robot développé au California Institute of Technology (Caltech), aux États-Unis, qui a la capacité de se transformer pour changer de comportement de locomotion, sans ajout ni suppression de composants. **A. D.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

UNIVERSITÉ PSL

QUESTIONS À

Brigitte Leridon

Chercheuse CNRS à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles

Enfin la supraconductivité à température ambiante ?

Une équipe sud-coréenne a mis en ébullition la communauté scientifique en annonçant avoir mis au point un matériau supraconducteur à température et pression ambiantes, le LK-99. Un « graal de la physique », si la découverte était confirmée.

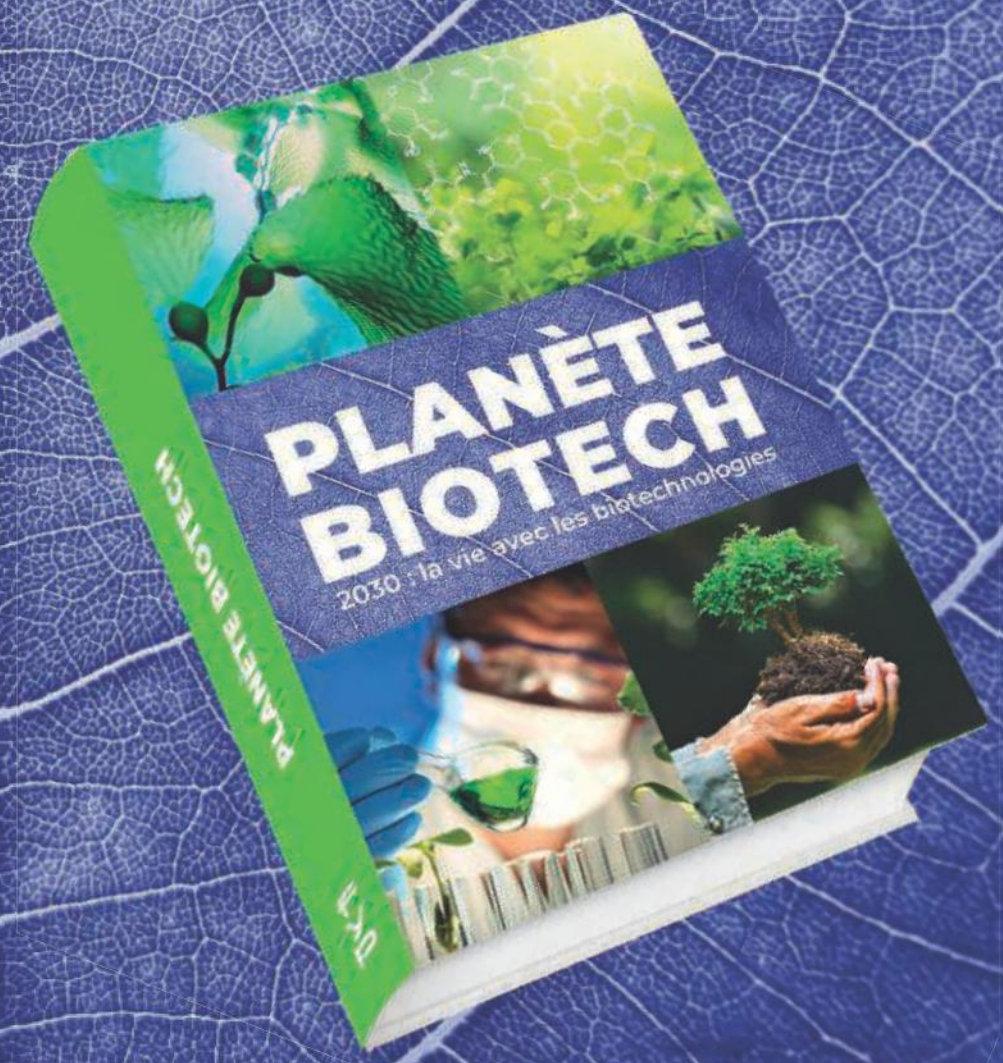
Qu'est-ce qu'un supraconducteur à température et pression ambiantes ?
La supraconductivité est un état de la matière où la résistance électrique disparaît. À l'heure actuelle, pour acheminer l'énergie produite vers les lieux où elle est utilisée, beaucoup d'énergie se dissipe par échauffement : c'est le fameux effet Joule. Un supraconducteur est un matériau qui conduit le courant électrique sans aucune perte. S'il fonctionne à température et pression ambiantes, et sous réserve qu'on puisse en faire des câbles, il permettrait donc d'importantes économies d'énergie.

Parler de « graal de la physique » est-il excessif ?
Non, parce que découvrir un tel matériau aurait des conséquences révolutionnaires. Non seulement pour acheminer le courant sans perte, mais aussi pour le développement des ordinateurs quantiques, produire des champs magnétiques intenses, ou encore pour maîtriser la lévitation…

Quelle est la prochaine étape ?
De telles annonces sur des supraconducteurs surviennent régulièrement, et sont démenties peu après. Cela explique la prudence des experts du domaine. Il faut donc attendre que d'autres laboratoires indépendants reproduisent les résultats présentés par les Sud-Coréens pour démontrer que le LK-99 est effectivement ce « graal ». Mais la probabilité que ce résultat ne soit jamais confirmé reste importante.

Propos recueillis par O. L.

L'ÉCOLE DES INGÉNIEUR·E·S EN BIOTECHNOLOGIES



À paraître le 4 avril 2023, ce deuxième ouvrage prospectif « 2030 : la vie avec les Biotechnologies » interroge sur la manière dont nous vivrons, nous nous nourrirons et nous nous soignerons dans le futur avec les biotechnologies.

Envie d'en savoir plus sur les études d'ingénieur en biotechnologie ? Rejoignez-nous pour une expérience immersive le 18 mars sur nos campus.
(INSCRIPTION OBLIGATOIRE)

Cti Commission des Titres d'Ingénieur

Sup' Biotech

concours Advance
INGÉNIEUR·E·S DE L'INNOVATION RESPONSABLE

Campus Lyon
De 10h à 14h30 - Embarquement
toutes les 30 min (durée 1h30)
156 Rue Paul Bert 69003 Lyon • 04 84 34 02 85

Campus Paris – Villejuif
De 10h à 14h20 - Embarquement
toutes les 20 min (durée 2h30)
66 rue Guy Môquet 94800 Villejuif • 01 84 07 19 16

www.supbiotech.fr

Établissement d'enseignement supérieur privé. Cette école est membre de IONIS EDUCATION GROUP

THE METALS COMPANY INC - IFREMER

Les nodules polymétalliques convoités par les sociétés minières se trouvent sur le plancher océanique, jusqu'à 6000 m de profondeur.

Un sursis pour les fonds marins

L'adoption d'un code minier pour l'exploitation des ressources du plancher océanique a été reportée à 2025.

Après trois semaines de débats au sein de l'Autorité internationale des fonds marins (AIFM), l'adoption d'un code minier pour l'exploitation des ressources du plancher océanique a été reportée à 2025. Un répit pour ces écosystèmes encore épargnés. Si de nombreux États — dont la France — ont déjà imposé un moratoire sur ces activités, l'appétit des industriels et de certains pays pour les minerais rares qui alimentent les batteries de la transition énergétique et autres solutions dites vertes, va croissant. Les alertes scientifiques se multiplient pourtant sur les impacts délétères de ces activités pour l'environnement. Alors que s'achevaient les débats de l'AIFM, une étude publiée dans *Current Biology* apportait un nouvel argument. Elle s'appuie sur les résultats d'une opération d'extraction test financée par le Japon en 2020 sur une bande d'environ 120 m de long de croûte riche en cobalt, dans le nord-ouest de l'océan Pacifique.

La densité d'animaux a chuté de 43 %

Il s'agit de la première opération de ce type dotée d'un volet scientifique pour évaluer les impacts environnementaux sur un an. Résultat : dans l'année qui a suivi, la densité d'animaux tels que les poissons et les crevettes a chuté de 43 % dans les zones directement touchées par les sédiments soulevés, et de 56 % dans les zones adjacentes. Les panaches de poussières océaniques soulevés à cette courte occasion auraient pu endommager les branchies des poissons et affecter l'approvisionnement alimentaire des espèces marines locales, selon les chercheurs. Sans parler des déchets miniers et des pollutions sonores, qui conduisent régulièrement à l'échouage mortel de mammifères marins.

En d'autres termes, l'exploitation des fonds marins, si elle venait à être facilitée en 2025, présage d'affecter durablement de vastes zones marines, pourtant essentielles à l'équilibre de la machine climatique et biologique mondiale. **S. R.**

6 Le nombre de pontes de tortues marines sur des plages françaises

ÉTHOLOGIE En trois semaines, au mois de juillet, six tortues marines de l'espèce protégée caouanne ont choisi des plages françaises pour faire leur nid — des Alpes-Maritimes à l'Hérault. Du jamais-vu pour cette espèce migratrice qui pond généralement sur la côte sud de la Méditerranée. L'éclosion devrait avoir lieu dans le courant de septembre. **H. J.**

C. YANG, NC STATE UNIVERSITY

174 variantes de peupliers éditées par CRISPR ont été cultivées.

Des arbres OGM pour du papier moins polluant

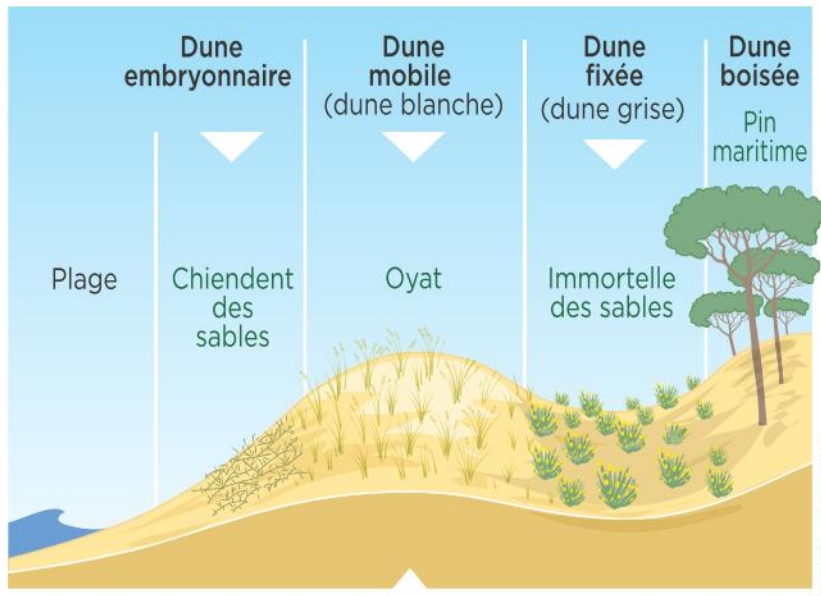
DENDROLOGIE En modifiant génétiquement par CRISPR des lignées de peupliers, une équipe est parvenue à diminuer de 49 % leur teneur en lignine. De quoi *« réduire considérablement »* les émissions carbone de la production de papier, selon les scientifiques. En effet, le processus qui permet de séparer, dans la structure du bois, la lignine de la cellulose qui compose le papier est gourmand en énergie. **H. J.**

SOURCE : DANIEL SULIS, UNIVERSITÉ D'ÉTAT DE CAROLINE DU NORD, ÉTATS-UNIS.

La dune grise en voie de disparition

Cette zone intermédiaire du littoral du sud-ouest de la France qui abrite un écosystème unique est menacée par l'action de l'océan et des vents.

Ce n'est pas une espèce mais tout un milieu naturel qui pourrait disparaître dans les prochaines décennies en Nouvelle-Aquitaine, prévient une étude du programme « Les sentinelles du climat ». Coincée entre, d'un côté, l'avancée de la dune mobile poussée par le travail de l'océan et les vents et, de l'autre, la forêt de pins maritimes, la dune grise est une zone intermédiaire peu spectaculaire mais unique, dont la surface s'est réduite de 46 % depuis 1997.



BRUNO BOURGEOIS

La dune embryonnaire est suivie de la dune blanche, où le sable mobile est fixé par les oyats. Ultime étape avant la dune grise.

S'étendant sur 230 kilomètres en Aquitaine et 70 kilomètres en Charente-Maritime, elle abrite en particulier l'immortelle des sables (*Helichrysum stoechas*) et le lézard ocellé, le plus grand d'Europe (50-70 cm). « *Ce n'est pas un milieu particulièrement riche, mais on ne retrouve dans aucun autre milieu les plantes qui poussent là* », prévient Kevin Romeyer, botaniste au Conservatoire botanique national Sud-Atlantique et coauteur de l'étude. **L. C.**

EN DEUX MOTS

REFORESTATION Pour lutter contre l'érosion de ses sols et le réchauffement, l'île de Pâques a lancé un programme de plantation de 240 000 arbres sur 10 des 164 km² de sa superficie. **SOBRIÉTÉ** La consommation en éclairage public des collectivités locales a baissé de 35,4 % à 2 heures du matin entre les mois de mai 2022 et 2023, selon Enedis. **MAMMIFÈRE** Les dauphins utilisent le parentais pour parler à leurs petits, une forme de langage spécifique que les adultes humains emploient pour s'adresser aux bébés.

V.GADE, A. SHATILOVICH

« Panagrolaimus kolymaensis » était congelé dans le pergélisol sibérien.

Deux nématodes sortent de 46 000 ans de sommeil

BIOLOGIE Deux petits vers congelés depuis 46 000 ans à 40 m de profondeur dans le pergélisol sibérien ont été ramenés à la vie en laboratoire. Ils ont ensuite donné naissance par parthénogenèse à plus de 100 générations, avant de mourir au bout de quelques semaines comme tout nématode. L'analyse génétique révèle qu'ils appartiennent à une espèce encore jamais décrite, baptisée *Panagrolaimus kolymaensis*. Ils pulvérisent le précédent record connu de congélation viable qui était de 25 ans. **P. K.**

SOURCE : ANASTASIA SHATILOVICH, INSTITUT RAS, RUSSIE.

ELLE A DIT

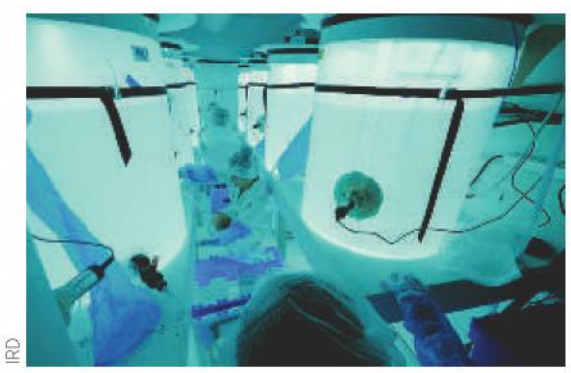
« Sur la base de données issues de la paléo-climatologie, il n'a pas fait aussi chaud sur la planète depuis 120 000 ans »

Samantha Burgess, directrice adjointe du service européen Copernicus sur le changement climatique, à propos du record de température moyenne de la planète atteint en juillet : 16,95 °C *(lire aussi p. 48)* .

Les volcans sous-marins fertilisent les océans

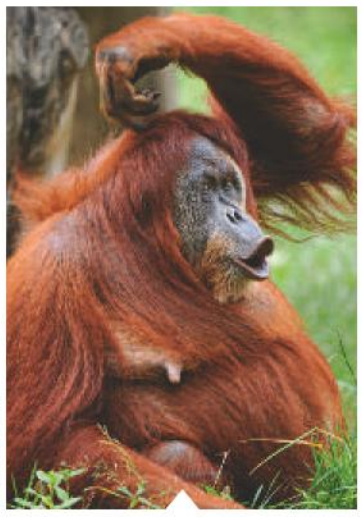
OCÉANOGRAPHIE Les sources hydrothermales peu profondes de la chaîne volcanique des Tonga, au large de la Nouvelle-Calédonie, sont à l'origine d'immenses efflorescences de plancton bactérien, révèle une mission d'exploration menée avec l'*Atalante*, le grand navire océanographique de l'Ifremer. Dans ces eaux en principe très pauvres en nutriments, les analyses chimiques ont montré que la concentration en fer, indispensable aux cyanobactéries, est dix fois supérieure à la normale à l'aplomb du volcan actif à 200 mètres de fond. **P. K.**

SOURCE : SOPHIE BONNET, UNIVERSITÉ AIX-MARSEILLE, FRANCE.



IRD

Les analyses ont été réalisées dans des réacteurs à bord du navire « Atalante ».



GETTY IMAGES

Ce grand singe n'a rien à envier aux « beatboxers ».

Les orangs-outans font des percussions avec la bouche

ÉTHOLOGIE Se fondant sur près de 4000 heures d'enregistrement des comportements vocaux d'orangs-outans sur l'île de Bornéo, en Indonésie, une équipe révèle que ces primates peuvent produire deux sons différents en même temps. À l'instar des « beatboxers » humains capables d'imiter des instruments de musique simultanément, ces appels biphoniques impliquent une production synchrone supralaryngée (lèvres, langue et mâchoires) et laryngée (cordes vocales) de sons. **A.-S. T.**

SOURCE : ADRIANO LAMEIRA, UNIVERSITÉ DE WARWICK, ROYAUME-UNI.

Santé précaire pour les anchois

HALIEUTIQUE La dernière campagne annuelle du programme de recherche de l'Ifremer sur l'abondance des poissons pélagiques en golfe de Gascogne, PelGas, montre que la biomasse d'anchois a été divisée par deux entre 2022 et 2023. Encore en deçà toutefois des années critiques de 2005 à 2009, où la pêche avait dû être fermée. Les chercheurs appellent à la vigilance. **L. C.**

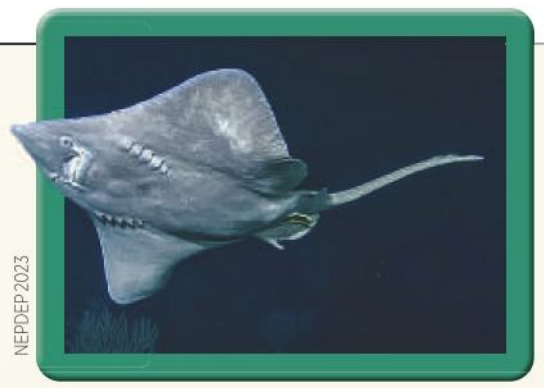
STAN SHEBS - CC BY-SA 3.0

«Tidestromia oblongifolia » est capable d'assurer la photosynthèse par 50 °C.

Une fleur de la vallée de la Mort au secours des cultures

BOTANIQUE Les caractéristiques génétiques d'un arbuste à fleurs poussant dans la vallée de la Mort en Californie (États-Unis) pourraient être exploitées pour rendre les cultures plus résistantes aux chaleurs croissantes. Même par 50 °C, *Tidestromia oblongifolia* présente encore une photosynthèse efficace selon les expériences réalisées. Les biologistes ont pu identifier des milliers de gènes impliqués dans la réponse à l'augmentation des températures. **H. J.**

SOURCE : KARINE PRADO, INSTITUT CARNEGIE DES SCIENCES À STANFORD, ÉTATS-UNIS.



NEPDEP 2023

À VOIR SUR LE NET

Un million d'œufs de raies découverts sur un volcan sous-marin

OCÉANOGRAPHIE À plus de 1500 m de profondeur, sur le flanc d'un volcan sous-marin au large du Canada, des biologistes marins du programme Northeast Pacific Deep-sea Expedition ont découvert une nurserie de raies comptant plus d'un million d'œufs géants selon eux. **M. P.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

Prédire les séismes, c'est presque possible

Grâce aux données GPS, les glissements accélérés entre des plaques tectoniques seraient perceptibles deux heures avant un séisme.

Deux sismologues français, Quentin Bletery et Jean-Mathieu Nocquet, de l'université Côte d'Azur à Nice, proposent dans *Science* une méthode pour prédire les grands tremblements de terre. En analysant des données GPS à haut débit enregistrées 48 heures avant 90 séismes majeurs (de magnitude supérieure à 7), ils ont pu identifier les signaux de glissements accélérés entre des plaques tectoniques.

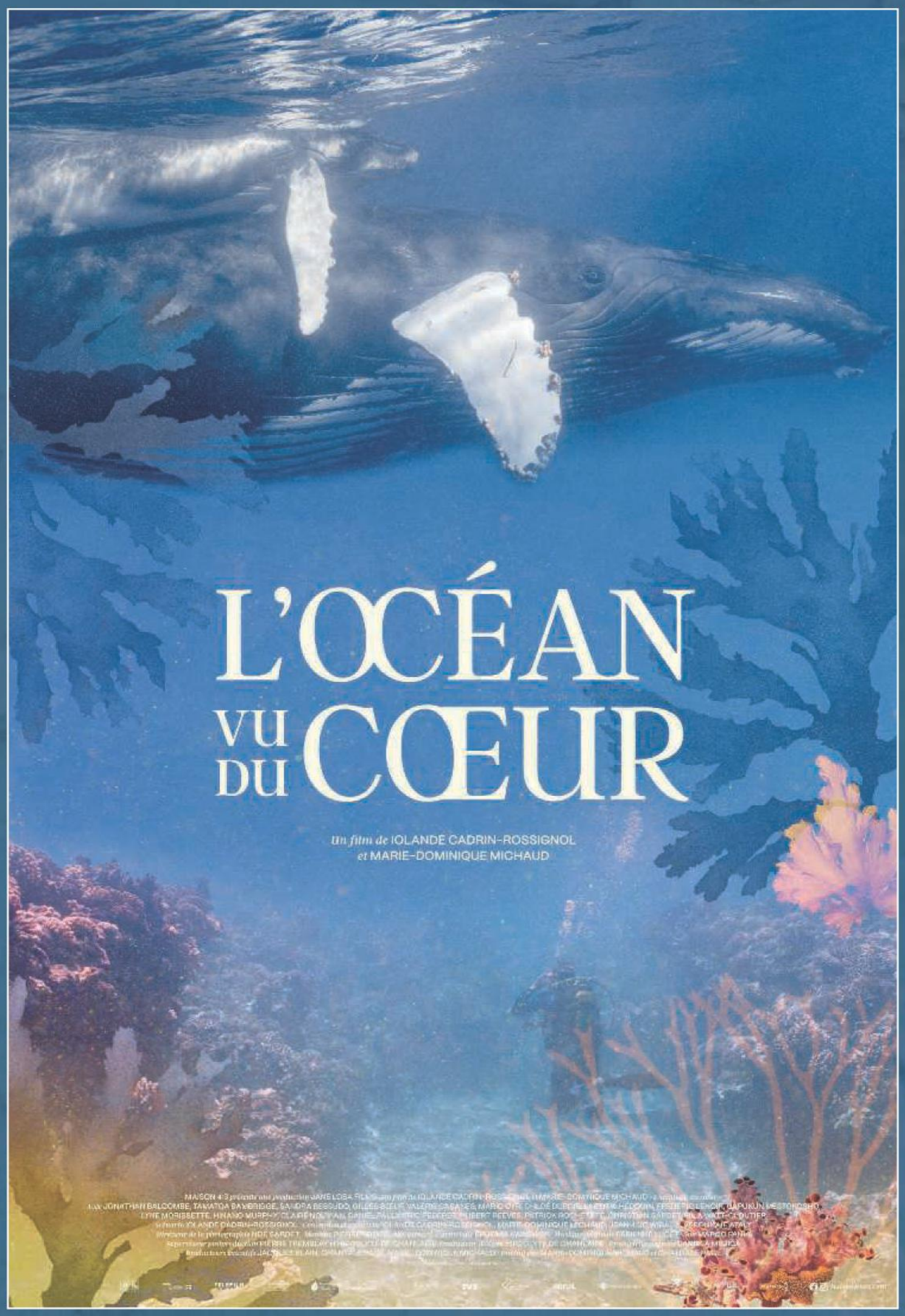
« Notre approche révèle une accélération exponentielle du glissement pendant environ deux heures avant les ruptures », écrivent-ils. En pratique toutefois, la précision des capteurs GPS actuels ne permet une telle détection qu'avec un grand ensemble de données. Seuls des capteurs de géo-positionnement capables de mesurer des mouvements d'un dixième de millimètre permettraient d'envisager un système d'alerte efficace. **S. R.**

C. ARCELAVIN/ZUMA/REA

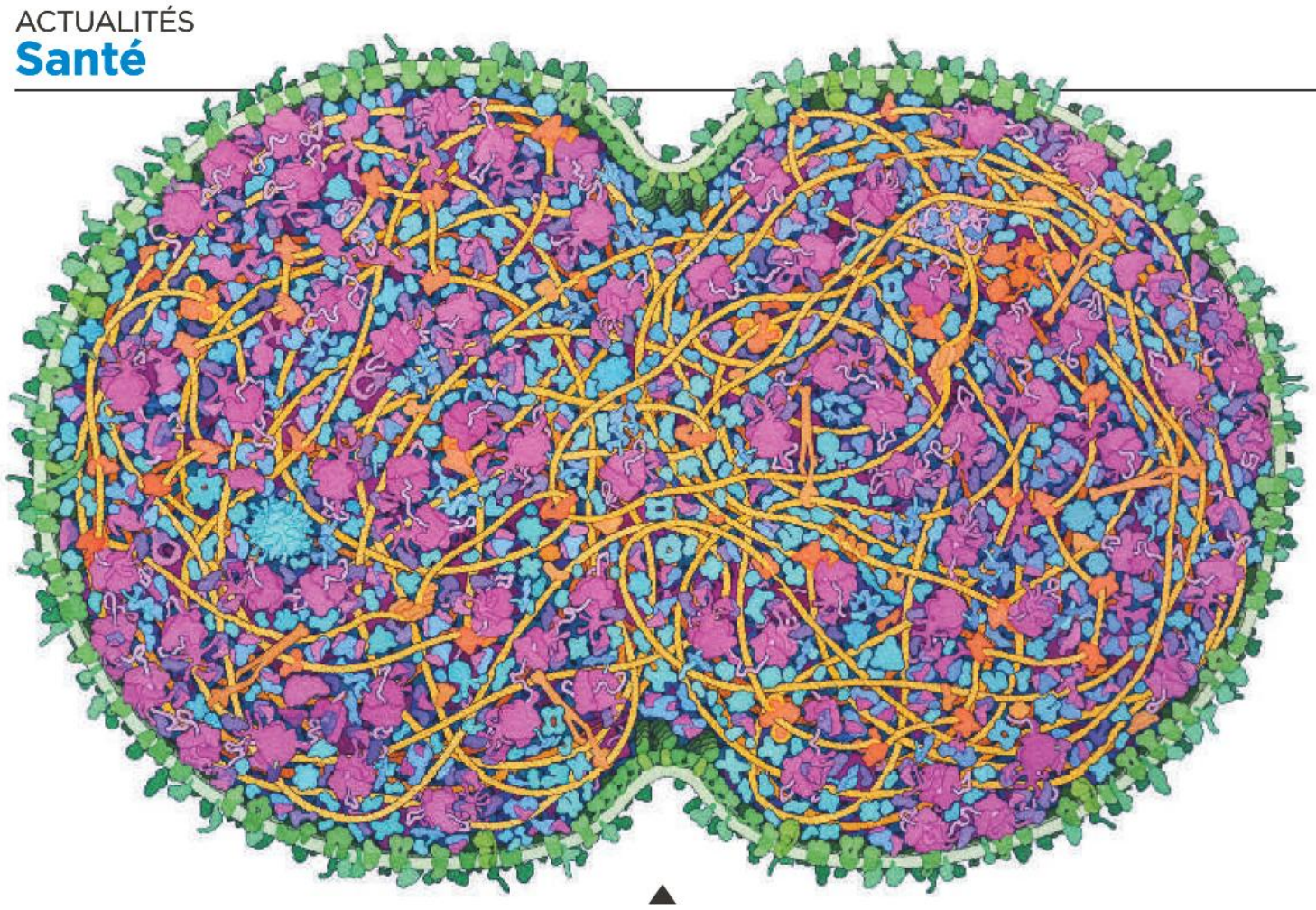
Le tremblement de terre de février en Turquie (ci-dessus) et en Syrie était de magnitude 7,8.

APRÈS

LA TERRE VUE DU CŒUR



AU CINÉMA **LE 13 SEPTEMBRE**



Paysage moléculaire de la cellule JCVI-syn3B au début de la division, réalisé à partir d'images par cryomicroscopie électronique détaillant l'ADN (jaune), la membrane (vert), les ARN (rose) et les enzymes (bleu).

Le génome minimal a évolué !

Des chercheurs ont démontré que la cellule contenant le plus petit génome du monde peut se reproduire et assurer la viabilité de sa descendance.

Mise au point en 2016 par le biologiste et homme d'affaires américain Craig Venter, *Mycoplasma mycoides* JCVI-syn3B est une bactérie ne contenant que le strict minimum du matériel génétique indispensable à la vie : 473 gènes exactement, pour un ADN 6000 fois plus petit que le génome humain. L'annonce de ce tour de force de la biologie de synthèse avait fait sensation. Mais on ignorait si ce « génome minimal » répondait pleinement à la définition du vivant, à savoir *« un système chimique autonome capable d'une évolution darwinienne »*, selon la Nasa. C'est sur ce dernier critère que l'équipe de Jay Lennon à l'université de l'Indiana à Bloomington (États-Unis) vient de lever le voile dans *Nature*. Alors qu'on pouvait craindre qu'une mutation intervenant sur ce génome minimal ne vienne gripper une machine si bien construite, il n'en est rien. Les chercheurs montrent au contraire que JCVI-syn3B présente un taux mutationnel très élevé, parmi les plus hauts du règne bactérien.

Certaines mutations lui sont profitables

Ils se sont intéressés en particulier au *« fitness »* de la cellule, un paramètre évolutif qui désigne la capacité à se reproduire et à assurer la viabilité de sa descendance. Comme on pouvait s'y attendre, la réduction du génome de la bactérie a sa plus simple expression a provoqué une réduction de moitié de son fitness. Mais les chercheurs montrent qu'après 2000 générations, la cellule a regagné, par sélection naturelle, la quasi-totalité de son fitness. Preuve que celle-ci tolère très bien la division cellulaire et que certaines mutations lui sont profitables. En revanche, elle n'a pas repris sa taille d'origine, au contraire des cellules non minimales qui, dans le même laps de temps, ont grossi de 85 %. La minimisation du génome a en outre permis de découvrir quels gènes et protéines sont essentiels à l'évolution de la cellule artificielle. **A. C.**

DAVID S. GOODSELL, RCSB PROTEIN DATA BANK

61 672

Les décès attribuables à la chaleur en Europe en 2022

ÉPIDÉMIOLOGIE Une étude menée par l'Inserm et l'Institut de Barcelone pour la santé globale (Espagne) a établi le nombre de décès dus à la chaleur entre le 30 mai et le 4 septembre 2022 à 61 672 en Europe, dont environ 5000 en France. 38 881 décès sont intervenus au cours de la plus grande anomalie thermique enregistrée entre le 11 juillet et le 14 août. **A. C.**

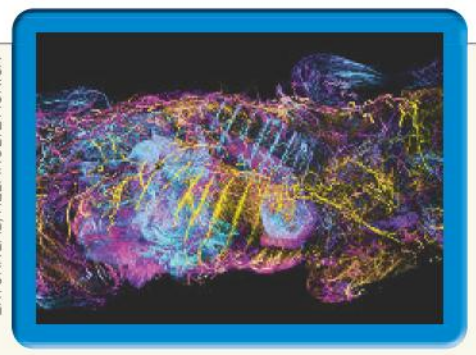
PLAINPICTURE

La rétine est sensible à la pollution atmosphérique.

Les particules fines font aussi vieillir les yeux

POLLUTION Outre ses effets connus sur les systèmes cardio-vasculaire, respiratoire et nerveux, la pollution atmosphérique attaque aussi les fibres nerveuses de la rétine, montre une étude française. L'exposition répétée aux particules fines serait ainsi un facteur de risque significatif du glaucome, une maladie neurodégénérative qui touche le nerf optique. **A. C.**

SOURCE : LAURE GAYRAUD, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX, FRANCE.



ERTÜRK LAB/HELMHOLTZ MUNICH

À VOIR SUR LE NET

Cartographier les corps à la cellule près

IMAGERIE Une nouvelle technique mise au point sur la souris, wildDISCO, offre des cartes anatomiques 3D complètes représentant dans des couleurs éclatantes les tissus, nerfs, vaisseaux sanguins à l'échelle cellulaire. Les chercheurs de l'université de Munich (Allemagne) ont obtenu ces images en injectant dans le corps de souris rendues transparentes des anticorps fluorescents. **H. J.**

Pour voir la vidéo, scannez ce QR code

G. LACZ/BIOSPHOTO

Le top 5 des aliments prébiotiques

Ces végétaux ont des propriétés bénéfiques pour l'organisme.

Les feuilles de pissenlit, le topinambour, l'ail, le poireau et l'oignon : voici les cinq aliments contenant le plus de prébiotiques, avec des concentrations variant entre 100 et 240 milligrammes par gramme, selon les résultats d'une méta-analyse communiqués lors du congrès de l'American Society for Nutrition, fin juillet. L'oignon semble être l'aliment le plus intéressant puisque tous ses dérivés crus et cuits comme les « rings » ou la crème d'oignon en contiennent encore de bonnes quantités (entre 50 et 60 mg/g).

Les prébiotiques servent de nourriture aux quelque cent mille milliards de micro-organismes qui peuplent nos intestins et forment le microbiote. Constitués de glucides complexes, contenus dans les fibres alimentaires, ils parviennent jusqu'au gros intestin sans voir été dégradés par les enzymes humaines. Dans le côlon, ils sont digérés par les bactéries du microbiote. Celles-ci les transforment en acide gras à chaîne courte qui ont des propriétés bénéfiques pour l'organisme. **J. I.**

Une thérapie génique appliquée par collyre

OPHTALMOLOGIE Atteint d'une maladie génétique rare, l'épidermolyse bulleuse dystrophique, un adolescent présentant des lésions dermatologiques et ophtalmiques participait à un essai clinique testant l'efficacité cutanée d'une thérapie génique développée sous forme d'un gel. Voyant l'état de la peau s'améliorer, le Dr Alfonso Sabater de l'université de Miami (États-Unis) a eu l'idée de demander au laboratoire un collyre spécifique pour l'œil. Un succès : la thérapie en gouttes ophtalmiques a permis au jeune garçon de retrouver la vue. S. R.-M.

W. LEE/AP/SIPA

Le jeune garçon a pu recouvrer la vue grâce au traitement.

Faire repousser les dents pourrait devenir une réalité

ODONTOLOGIE
Une équipe japonaise a identifié une voie génétique prometteuse impliquée dans le contrôle du développement dentaire. De quoi nourrir l'espoir d'être un jour en mesure de faire repousser les dents. Des premiers essais encourageants ont été menés chez des furets. Une étape qui devrait conduire d'ici à un an au démarrage des premiers essais de régénération dentaire chez l'humain. S. R.-M.

SOURCE : A. MURASHIMA-SUGINAMI, UNIVERSITÉ DE KYOTO, JAPON.

Klotho, la protéine anti-âge

GÉRONTOLOGIE Une seule injection de klotho, une hormone antivieillissement découverte en 1997, à des macaques âgés améliore nettement leur mémoire spatiale. L'effet de la protéine, sensible au bout de quatre heures, a perduré au moins deux semaines chez les singes des deux sexes. Les bons résultats obtenus ouvrent la possibilité d'essais cliniques de klotho pour traiter les problèmes cognitifs dus à l'âge. **P. K.**

SOURCE : STACY CASTNER, UNIVERSITÉ YALE, ÉTATS-UNIS.

L'oxymel a bien des propriétés antibactériennes

PHARMACOLOGIE Utilisé depuis le médecin Hippocrate (460 à 377 avant notre ère), l'oxymel, mixture de miel et de vinaigre, a bel et bien des propriétés antiseptiques et antibiotiques, révèle une étude. Les expériences menées en laboratoire sur des biofilms bactériens montrent que leur mélange produit un effet de synergie redoutable. Associé au miel, le vinaigre de vin rouge s'avère très efficace contre le staphylocoque doré et *Pseudomona aeruginosa*, deux des bactéries les plus agressives en matière d'affections nosocomiales. **H. R.**

SOURCE : FREYA HARRISON, UNIVERSITÉ DE WARWICK, ROYAUME-UNI.

FRANCE TÉLÉVISIONS

Les échantillons biologiques seront transportés par drone entre les hôpitaux de Maubeuge et Valenciennes, distants de 41 kilomètres.

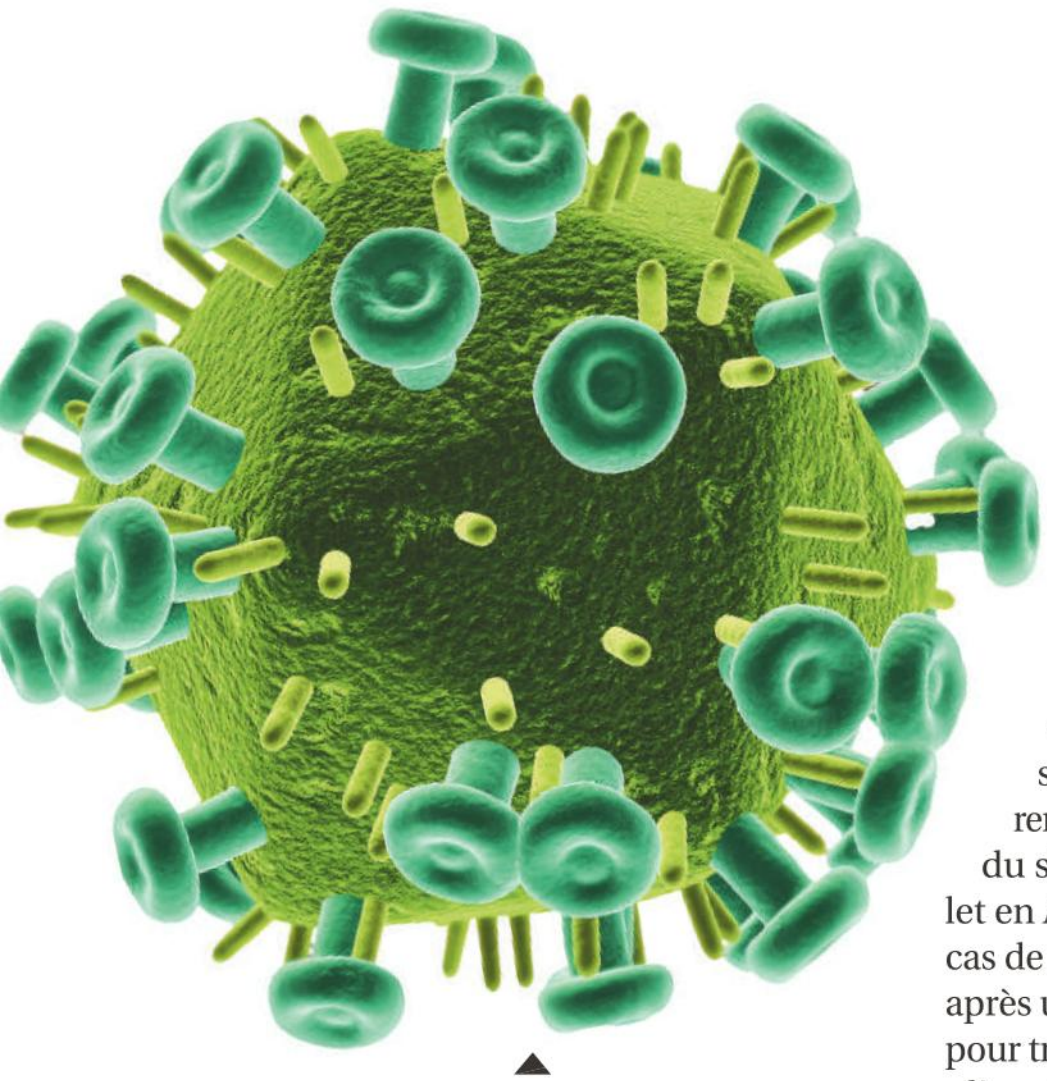
De plus en plus de drones pour relier les hôpitaux

LOGISTIQUE Les hôpitaux de Maubeuge et de Valenciennes (Nord) seront bientôt reliés par drones. Tel est le projet AirShab de la société Delivrone qui prévoit un transport par les airs d'échantillons biologiques (tubes de sang, échantillons d'urine) entre ces deux établissements situés à 41 kilomètres l'un de l'autre. Les vols de test sont en cours et ont prouvé un gain de 20 minutes par rapport à la route. Autres avantages selon les ingénieurs du projet : des gains financier et écologique, avec environ 95 % d'impact carbone en moins. **S. R.-M.**

IL A DIT

« Les personnes qui croisent ce virus vont être réinfectées, c'est certain »

Étienne Simon-Lorière, virologue à l'Institut Pasteur de Paris et responsable du Centre national des virus respiratoires, à propos du nouveau variant du Sras-CoV-2, EG.5.1 aussi appelé Eris, dont une mutation lui confère un avantage de transmissibilité et le rend plus difficile à neutraliser par l'organisme.



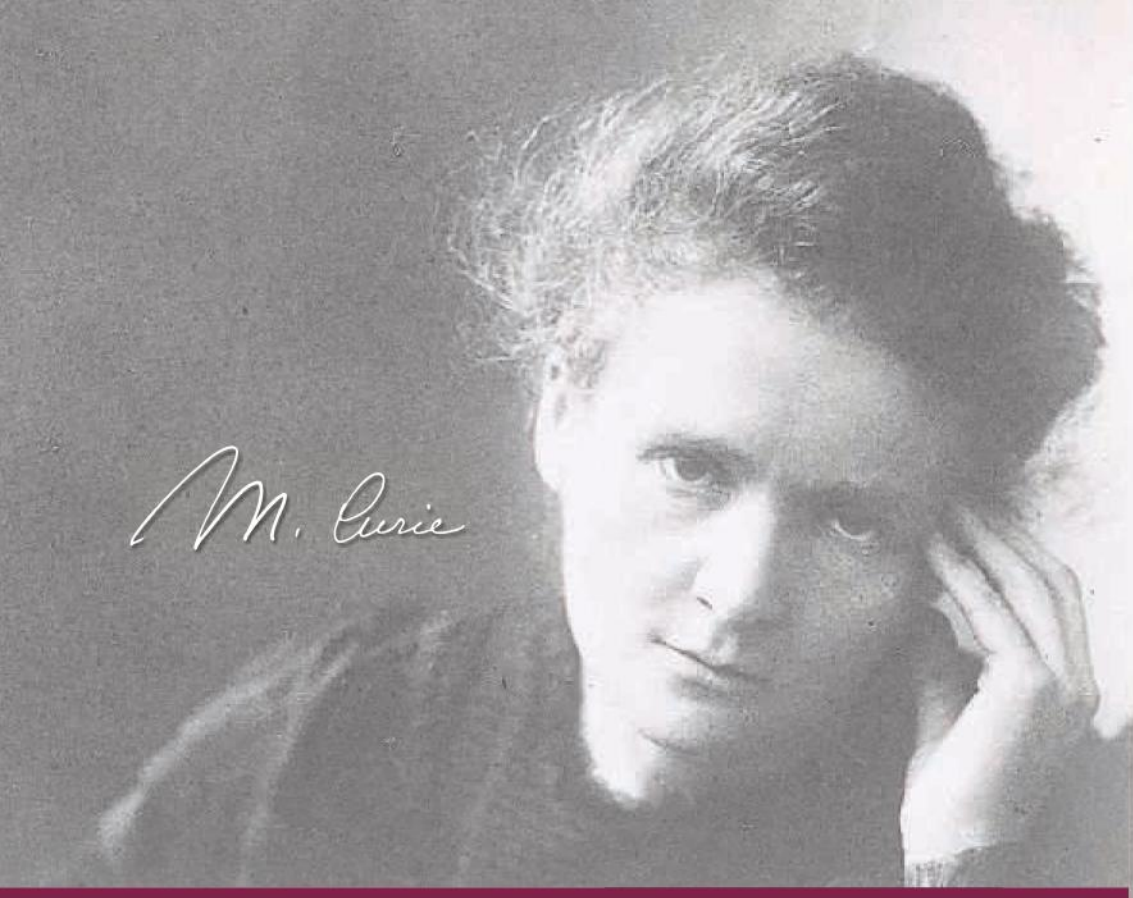
Aucune particule virale n'a plus été détectée depuis vingt mois chez le « patient de Genève » (illustration).

BSIP

Sida : une étrange rémission

Un sixième patient semble avoir guéri du VIH après une greffe de moelle osseuse.

Un homme de 49 ans porteur du virus de l'immunodéficience humaine (VIH) depuis 1990 pourrait être le sixième patient à guérir du sida après une greffe de moelle osseuse. C'est ce qu'a rapporté une équipe franco-suisse en marge de la Conférence de la société internationale du sida, qui s'est tenue fin juillet en Australie. Les cinq premiers cas de rémission du sida constatée après une greffe de moelle osseuse pour traiter un cancer du sang s'expliquaient par le fait que les donneurs de moelle étaient porteurs de la mutation CCR5 delta-32 qui empêche l'entrée du VIH dans les cellules *(lire* S. et A. *n° 914)*. Mais, fait étonnant, ce n'est pas le cas pour ce « patient de Genève » dont la rémission reste mystérieuse. *« Nous explorons avec cette situation singulière des voies nouvelles dans l'espoir que la rémission, voire la guérison du VIH, ne soit plus un événement exceptionnel »*, affirme Alexandra Calmy, infectiologue aux Hôpitaux universitaires de Genève (Suisse). Si le virus reste indétectable vingt mois après la fin des traitements, les médecins n'excluent pas la possibilité que celui-ci persiste en l'absence de cette fameuse mutation protectrice. **A. C.**



Transmettre l'espoir de vaincre le cancer

Léguez à l'Institut Curie, 1er Centre français de recherche en cancérologie

Transmettre tout ou une partie de ses biens à l'Institut Curie, premier centre français de recherche en cancérologie, est un formidable message d'espoir pour tous ceux qui luttent contre le cancer.

En soutenant les efforts de l'Institut Curie, fondé par Marie Curie, vous effectuez un geste de générosité envers les générations futures, vous donnez aux chercheurs et médecins les moyens de prendre le cancer de vitesse et associez votre nom à ce combat pour la vie.

LEGS - DONATIONS - ASSURANCES-VIE

institut Curie
ENSEMBLE, PRENONS LE CANCER DE VITESSE

curie.fr

Pour tout renseignement contacter Catherine Ricatte - Institut Curie :
26, rue d'Ulm - 75248 Paris Cedex 05 - 01 56 24 55 34 - catherine.ricatte@curie.fr

institut Curie

BULLETIN DE DEMANDE D'INFORMATION à compléter à retourner sous enveloppe à l'adresse ci-dessus.

☐ Je désire recevoir votre documentation sur les legs, donations et assurances-vie en faveur de l'Institut Curie.

☐ Je souhaite être contacté en toute confidentialité par votre responsable legs, donations et assurances-vie.

Vous pouvez me joindre au numéro ci-contre ▶

☐ Mme ☐ M. Nom : .....

Prénom : .....

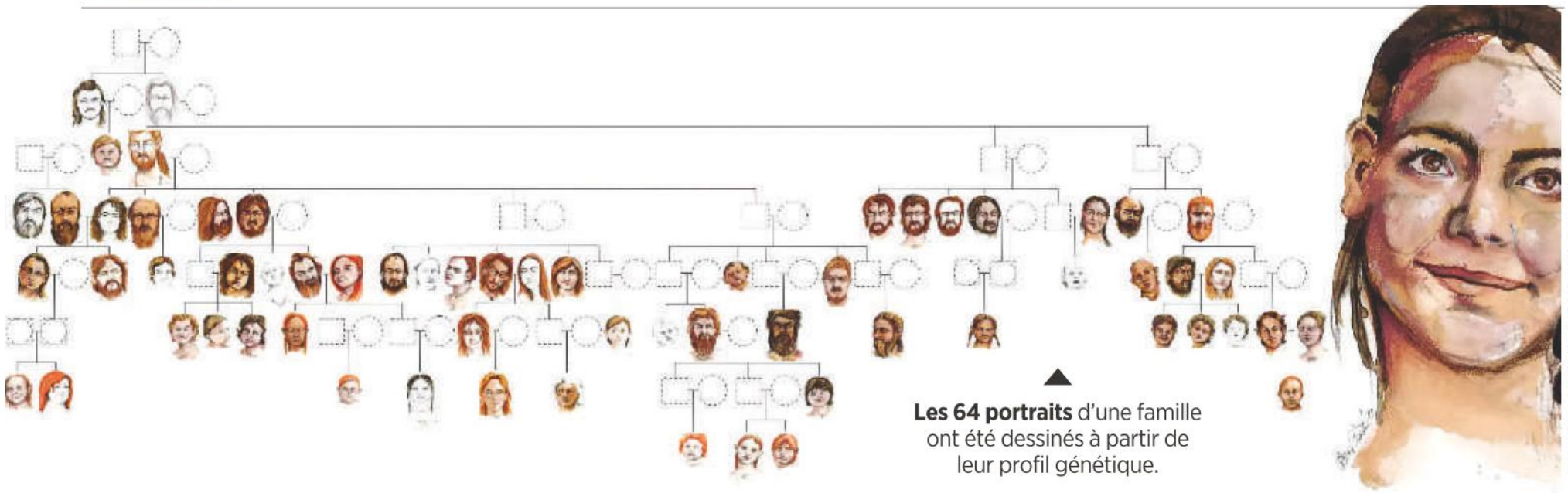
Adresse : .....

Code postal : |_|_|_|_|_|

Ville : .....

Tél. : |_|_| |_|_| |_|_| |_|_| |_|_|

S&A0623



Les 64 portraits d'une famille ont été dessinés à partir de leur profil génétique.

ELENA PLAIN, UNIVERSITÉ DE BORDEAUX/PACEA

La généalogie reconstituée de familles du néolithique

Des paléogénéticiens sont parvenus à établir les liens de parenté de 94 individus ayant vécu à proximité d'Auxerre il y a près de 7000 ans.

Deux arbres généalogiques s'étendant sur sept générations il y a près de 7000 ans reconstitués à partir d'ADN ancien, c'est l'extraordinaire tour de force accompli par une équipe de paléogénéticiens de l'université de Bordeaux et de l'Institut Max-Planck d'anthropologie évolutionnaire de Leipzig (Allemagne). Présentés dans la revue *Nature*, leurs travaux s'appuient sur 128 sépultures mises au jour aux Noisats, une importante nécropole du néolithique moyen daté de 4850-4500 avant notre ère, située à Gurgy, à quelques kilomètres d'Auxerre (Yonne). Les chercheurs ont réussi à extraire l'ADN ancien de 94 individus et à relier la plupart d'entre eux sur le plan génétique.

Pères, mères, frères et sœurs se répartissent entre deux familles principales : la première *(illustration ci-dessus)* compte 64 personnes (20 femmes, 44 hommes) sur sept générations, la seconde 12 personnes (7 femmes, 5 hommes) sur cinq générations. La généalogie reconstituée révèle que les générations sont reliées entre elles quasi uniquement par les lignées masculines. « *Ce schéma général indique une exogamie féminine et un système dans lequel les femmes migraient de leur lieu de naissance vers la résidence de leur partenaire reproducteur masculin* », concluent les chercheurs. Cette habitude indique que la communauté de Gurgy était non seulement reliée à d'autres communautés, assez nombreuses pour éviter la consanguinité, mais que « *des liens préférentiels ou des dépendances* » étaient à la base de ces formes d'alliance. Ce schéma social, assorti à de bonnes conditions de santé et de nutrition, a permis un fort taux de reproduction, avec plus de quatre enfants atteignant l'âge adulte, sur plusieurs générations. Grâce à cette grande stabilité, les familles ont occupé la zone pendant une centaine d'années, alors qu'elles ne maîtrisaient pas encore une agriculture durable. **S. de L.**

Des parures reculent la date de la présence humaine en Amérique

ARCHÉOLOGIE La confirmation que trois petits os de paresseux géant ont servi d'ornements il y a 27 000 ans au cœur du Brésil actuel accrédite la théorie d'une arrivée précoce des premiers humains sur le continent américain, bien avant -16 000 ans, date la plus souvent admise. Ces artefacts étaient percés pour être portés en pendentifs. **S. de L.**

SOURCE : T. PANSANI, UNIVERSITÉ DE SÃO CARLOS, BRÉSIL.

SIPA

Les vertèbres de « Perucetus colossus » (illustration) ont été mises au jour au Pérou (à gauche).

Ce cétacé est l'animal le plus lourd ayant vécu sur Terre

PALÉONTOLOGIE L'analyse de 13 gigantesques vertèbres fossiles découvertes au Pérou révèle l'existence passée d'un mammifère marin pouvant peser jusqu'à 340 tonnes ! *Perucetus colossus*, qui vivait il y a 39 millions d'années, détrône ainsi la baleine bleue (130 tonnes en moyenne) au rang de l'animal le plus lourd ayant jamais vécu sur Terre. **M. da P.**

SOURCE : GIOVANNI BIANUCCI, UNIVERSITÉ DE PISE, ITALIE.

RÊVER À NOUVEAU C'EST TOUT UN APPRENTISSAGE

Apprentis d'Auteuil aide chaque année près de 40 000 jeunes[1] en difficulté à bâtir leur avenir.

Soutenez-nous sur www.apprentis-auteuil.org

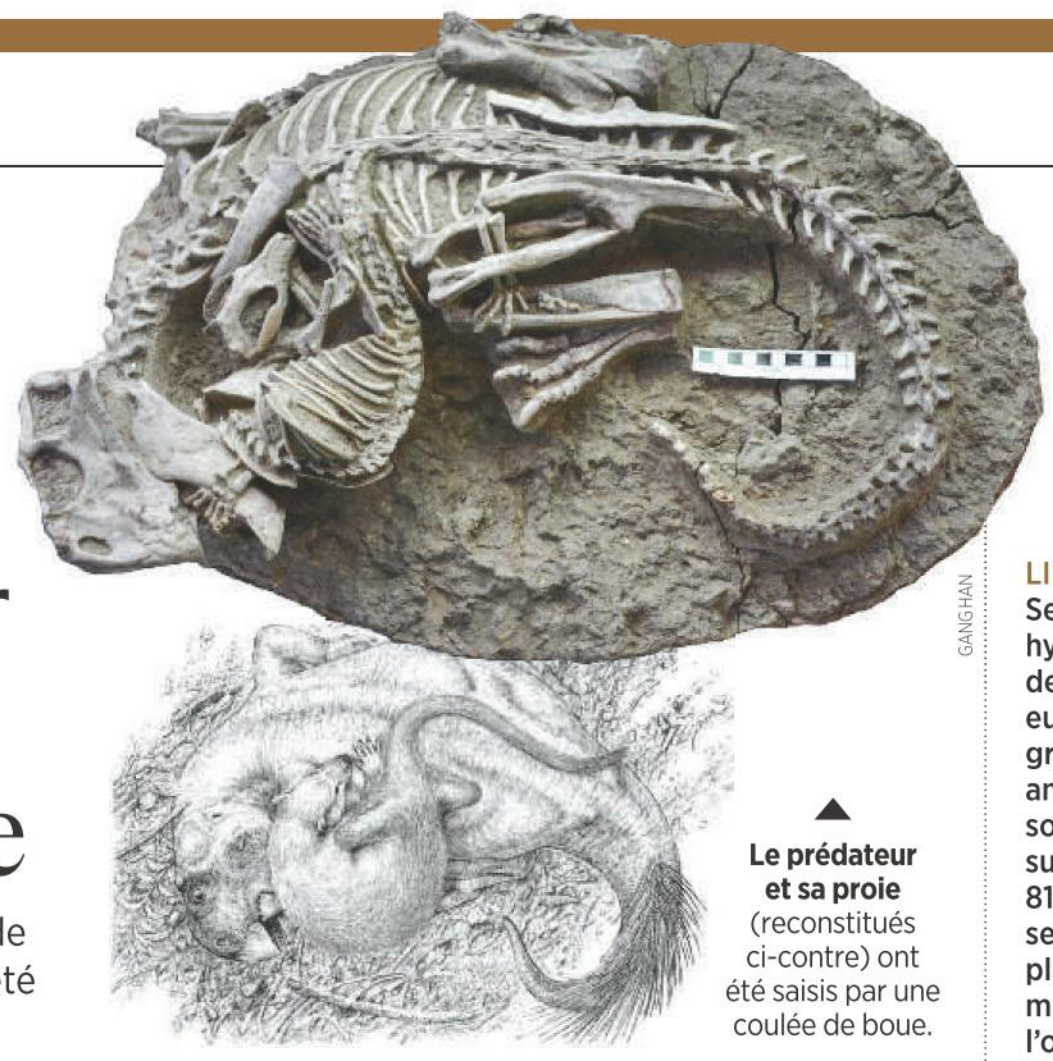
APPRENTIS D'AUTEUIL

La confiance peut sauver l'avenir

(1) Selon le rapport d'activité Apprentis d'Auteuil 2022. Agence Marcel - © Yann Le Pape

Un dinosaure croqué par un petit mammifère

Ce fossile illustrant une scène de prédation inédite au crétacé a été découvert en Chine.



GANGHAN

Le prédateur et sa proie (reconstitués ci-contre) ont été saisis par une coulée de boue.

Les proies ne sont pas toujours celles qu'on croit. Un fossile vieux de 125 millions d'années témoigne d'une scène de prédation inédite au crétacé : un petit mammifère s'attaquant à un dinosaure deux fois plus grand que lui ! Découvert en Chine, dans une zone appelée la « Pompéi des dinosaures », le fossile a été analysé au Musée canadien de la nature à Ottawa. Il montre un *Psittacosaurus*, un bipède à bec, couché sur le ventre avec ses membres postérieurs repliés, aux prises avec un mammifère d'une cinquantaine de centimètres de long à l'allure de blaireau (*Repenomamus robustus*), qui s'agrippe à lui tandis que ses dents se plantent dans le flanc du dinosaure.

La position des deux corps indique clairement qu'un acte de prédation était en cours lorsque les deux animaux ont été pris dans une coulée de boue, indiquent les auteurs de l'étude. Par ailleurs, l'absence d'autres marques de dents sur les os du *Psittacosaurus* montre que le mammifère n'était pas en train de se nourrir d'une carcasse. Et, le dinosaure étant herbivore, c'est bien lui qui était la proie ici. **J. I.**

Aux sources des langues indo-européennes

LINGUISTIQUE **Selon une nouvelle hypothèse, la famille des langues indo-européennes (latin, grec ancien, vieil anglais, etc.) trouverait son origine dans le sud du Caucase il y a 8120 ans. De là, elle se serait scindée en plusieurs branches migratoires : une vers l'ouest, passant par la Turquie jusque dans l'actuelle Grèce ; une autre vers le nord jusqu'aux régions des steppes il y a 7000 ans, avant de se séparer à nouveau avec des diffusions vers l'Europe et l'Asie. M. da P.**

SOURCE : P. HEGGARTY, INSTITUT MAX-PLANCK À LEIPZIG, ALLEMAGNE

Comment Neandertal distillait le goudron il y a 80 000 ans

ARCHÉOLOGIE Selon des analyses chimiques, les néandertaliens usaient d'un processus complexe pour fabriquer le goudron de bouleau qui reliait les manches et pointes de leurs armes. La colle n'était pas obtenue en brûlant de l'écorce à l'air libre, mais distillée dans des structures limitant la circulation d'oxygène : soit deux fours superposés, l'un souterrain pour recueillir le distillat, l'autre formant une chambre haute en sédiments pour accueillir l'écorce. Le tout était recouvert d'un feu brûlant plusieurs heures. Ce procédé, attesté il y a 80 000 ans en Allemagne, est probablement le fruit d'une longue amélioration technique, transmise culturellement. **R. M.**

SOURCE : P. SCHMIDT, UNIVERSITÉ KARL EBERHARDT DE TÜBINGEN, ALLEMAGNE.

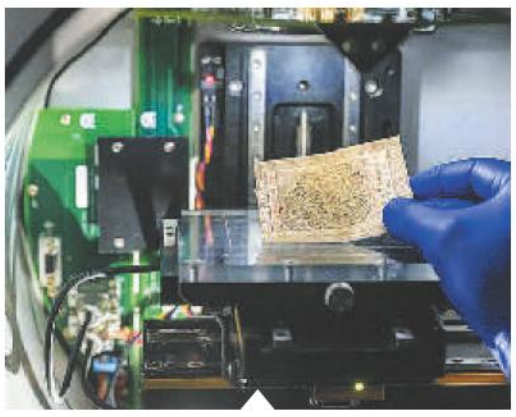
Deux fours superposés, l'un en surface, l'autre sous terre, produisaient le goudron distillé servant de colle.

P. SCHMIDT ET AL.

Le personnel du Machu Picchu venait de loin

PALÉOGÉNÉTIQUE **Les domestiques du palais fortifié du Machu Picchu, résidence d'hiver de l'empereur inca Pachacútec (1438-1471), venaient des quatre coins de l'empire, révèle l'étude génétique de 34 personnes enterrées sur place au XVe siècle. Elles étaient originaires de la plaine d'Amazonie, de l'Équateur et de la Colombie actuels, de la côte péruvienne ou des hauts plateaux, ce que corroborent la morphologie de leur squelette et les objets trouvés à leur côté. P. K.**

SOURCE : LUCY SALAZAR, UNIVERSITÉ YALE, ÉTATS-UNIS.



BARBARA JOHNSTON / UNIVERSITY OF NOTRE DAME

La spectroscopie laser a révélé les techniques anti-contrefaçon des billets.

Le secret des billets de banque de Benjamin Franklin

BILLETOPHILIE Des analyses par spectroscopie laser de billets de banque conçus et imprimés dès 1731 par Benjamin Franklin montrent que ce « Père fondateur de l'Amérique » avait mis au point les premières techniques anti-contrefaçon. Outre des encres spéciales difficiles à se procurer pour les faussaires, il avait créé une pâte à papier spéciale, intégrant de minuscules fibres colorées. **M. B.**

SOURCE : KHACHATHUR MANUKYA, UNIVERSITÉ NOTRE-DAME, ÉTATS-UNIS.

Le théâtre de Néron enfin retrouvé

ARCHÉOLOGIE C'est sous les jardins du palais Della Rovere, à quelques pas de la place Saint-Pierre à Rome (Italie), que le théâtre impérial de Néron a finalement été retrouvé, a annoncé la Surintendance spéciale pour les biens archéologiques de Rome. Les fondations de l'édifice (Ier siècle de notre ère) qui ont été découvertes correspondent aux descriptions qui en sont faites dans les textes anciens de Pline et de Tacite, lesquels évoquent les fastueux spectacles donnés pendant le court règne de l'empereur matricide (54 à 68). **H. J.**

ARCHÄOLOGIE-BÜRO DR. WOIDICH

L'arme, dont la datation est estimée à 1400 ans avant notre ère, a été retrouvée avec tout son éclat dans une tombe en Bavière (Allemagne).

Une remarquable épée en bronze

ARCHÉOLOGIE Une épée en bronze datant sans doute du XIVe siècle avant J.-C., remarquablement conservée, a été mise au jour à Nördlingen, en Bavière (Allemagne). Même après 3400 ans enfouie sous terre, sa lame luisait encore. L'arme de l'âge du bronze moyen reposait dans une sépulture, le long du corps d'un défunt. Des analyses plus poussées sont en cours pour déterminer les caractéristiques de cette épée et de cette tombe, a annoncé l'Office bavarois des monuments historiques. **M. B.**

L'actualité se poursuit sur Internet

www.sciencesetavenir.fr - www.larecherche.fr

NASA/JPL-CALTECH

PLANÉTOLOGIE

Le noyau de Mars percé à jour

Les perturbations d'un lien radio entre Mars et la Terre ont permis de révéler les détails de l'intérieur de la planète Rouge invisibles à la sismologie martienne. À lire sur le site de *La Recherche*. **https://bit.ly/919mars**

AUDIO

Les podcasts de « Sciences et Avenir »

Retrouvez tous nos sujets abordés par nos journalistes dans « Sixième Science », le podcast de vulgarisation scientifique réalisé avec *20 Minutes*. **sciav.fr/919podcast**

POUR TOUT SAVOIR DE LA SCIENCE

SI VOUS AVEZ...

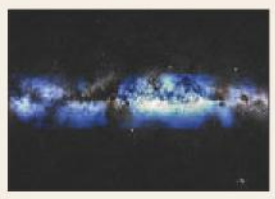
2 minutes

Le chantier du « super-égout » de Londres

Un énorme tunnel de 25 kilomètres de long doit permettre de moderniser les égouts londoniens du XIXe siècle pour dépolluer la Tamise. Un chantier dantesque à découvrir en vidéo. **sciav.fr/919london**

5 minutes

La cartographie des neutrinos galactiques



Pour la première fois, notre galaxie a pu être dessinée à partir de particules de matière plutôt que du rayonnement électromagnétique. **sciav.fr/919neutrino**

10 minutes

« Oppenheimer » de Christopher Nolan décrypté

L'historien des sciences et expert de Robert Oppenheimer, Ivan Kiriow, décrypte les partis pris du dernier film de Christopher Nolan sur le père de la bombe atomique. **sciav.fr/919atom**

AFP ; ICECUBE COLLABORATION ; UNIVERSAL STUDIO

Vous êtes déjà 2 millions à nous suivre sur Facebook

Avast One

L'INGÉNIERIE SOCIALE, ET COMMENT S'EN PRÉMUNIR ?

Dans toute chaîne de sécurité, le maillon faible est en général l'élément humain, car il est sensible à toutes sortes de tactiques de manipulation. Les techniques d'ingénierie sociale tirent parti de cette vulnérabilité humaine pour inciter les victimes à divulguer leurs informations privées. Apprenez à repérer une attaque par ingénierie sociale.

Qu'est-ce que l'ingénierie sociale ?

L'ingénierie sociale désigne la pratique consistant à utiliser des techniques psychologiques pour manipuler le comportement de quelqu'un. L'ingénierie sociale exploite l'erreur humaine et encourage les victimes à agir contre leurs intérêts. Dans le domaine de la sécurité des informations, l'ingénierie sociale pousse les gens à divulguer des données privées en ligne, comme leurs identifiants de connexion ou leurs informations financières. Dans d'autres contextes, l'ingénierie sociale a une signification légèrement différente. Dans les sciences sociales, par exemple, l'ingénierie sociale se définit simplement comme l'effort visant à influencer psychologiquement les comportements sociaux à l'échelle d'un groupe. Il peut s'agir d'encourager la population à se comporter correctement dans les transports en commun, à arrêter de fumer, voire à soutenir une révolution politique. Nous nous concentrerons ici sur l'ingénierie sociale dans le contexte de la sécurité des informations, où l'ingénierie sociale peut être définie comme un cybercrime.

Types d'attaques par ingénierie sociale

L'une des meilleures façons de se protéger contre une attaque par ingénierie sociale est de se familiariser avec les méthodes courantes utilisées dans ce domaine. De nos jours,

l'ingénierie sociale est fréquente en ligne, même par le biais d'escroqueries sur les réseaux sociaux, où les malfaiteurs se font passer pour un contact de confiance ou une figure d'autorité afin de manipuler les gens pour qu'ils divulguent des informations confidentielles.

Phishing (hameçonnage)

Les communications sont maquillées pour sembler provenir d'une source fiable. Ces messages, souvent des e-mails, sont conçus pour inciter les victimes à fournir leurs informations personnelles ou financières. Après tout, pourquoi douter de l'authenticité d'un e-mail qui a été envoyé par un ami, un membre la famille ou un contact professionnel ?

Phishing ciblé

Le phishing ciblé est un type d'attaque par ingénierie sociale qui cible les grandes entreprises ou des individus spécifiques. Les attaques de phishing ciblé visent très précisément de petits groupes ou des personnes puissantes, comme des chefs d'entreprise et des célébrités

Vishing (hameçonnage vocal)

Une forme plus sophistiquée de phishing. Dans ce type d'attaque, un numéro de téléphone est généralement usurpé pour paraître légitime. Les pirates peuvent se faire passer pour des techniciens informatiques, des collègues ou des banquiers.

Smishing (hameçonnage par SMS)

Prend la forme de messages texte, ou SMS. Ces attaques poussent généralement la victime à effectuer rapidement une action et comportent un lien malveillant ou un numéro de téléphone à appeler. Les attaques de smishing véhiculent souvent un sentiment d'urgence pour inciter les victimes à agir vite et à se laisser prendre au piège.

Scareware (alarmiciel)

Un type de malware qui utilise l'ingénierie sociale pour inciter les gens à télécharger un faux logiciel de sécurité ou à visiter un site infecté par un malware. Les scarewares apparaissent généralement sous la forme de fenêtres pop-up prétendant vous aider à supprimer un virus informatique supposément détecté sur votre appareil. Une fois que vous cliquez sur la fenêtre, vous êtes redirigé vers un site malveillant ou vous installez sans le savoir encore plus de malwares.

Pretexting (usurpation d'identité)

Le pretexting consiste à créer un faux

scénario, ou « prétexte » pour tromper les victimes. Les attaques par pretexting peuvent se produire en ligne ou hors ligne, et font partie des astuces les plus efficaces de l'ingénierie sociale ; les pirates mènent des recherches exhaustives pour se faire passer pour des interlocuteurs authentiques.

Piège à miel

Un type d'ingénierie sociale dans lequel un pirate attire une victime dans une situation sexuelle délicate. Le malfaiteur utilise alors la situation comme une opportunité de sextortion ou de tout autre chantage. Les pirates exploitant l'ingénierie sociale tendent souvent des pièges en envoyant des e-mails de spam dans lesquels ils prétendent vous avoir « observé via votre webcam » ou par un autre moyen tout aussi sinistre.

Le spam par e-mail

L'une des formes les plus anciennes responsable de la majorité des messages indésirables qui encombrent votre boîte de réception. Dans le meilleur des cas, le spam par e-mail est simplement irritant, mais dans le pire des cas, ce n'est pas juste du spam, mais une arnaque visant à obtenir des informations personnelles.

Comment se préserver de l'ingénierie sociale

Le meilleur moyen de se protéger de ces attaques est de savoir les repérer. Une fois que vous êtes pris dans une attaque d'ingénierie sociale, il peut être difficile de s'en sortir. Heureusement, pas besoin d'être expert pour mettre en place une bonne prévention de l'ingénierie sociale : un peu d'intuition et de bon sens suffisent.

Vérifiez les sources

Si vous recevez un e-mail, un SMS ou un appel téléphonique d'une source inconnue, saisissez-le dans un moteur de recherche et voyez ce qui en ressort. S'il s'agit d'une attaque par ingénierie sociale connue, l'expéditeur peut avoir été signalé auparavant. Même si l'expéditeur semble tout à fait digne de confiance, vérifiez quand même, l'adresse e-mail ou le numéro de téléphone pouvant être légèrement différents de la véritable source et en lien avec un site web frauduleux.

Si c'est trop beau pour être vrai, ce n'est probablement pas vrai

Un esprit critique minimal est l'un des meilleurs moyens d'éviter les attaques par ingénierie sociale. Des attaques récentes par ingénierie sociale menées sur Twitter ont impliqué des célébrités telles qu'Elon Musk et Bill Gates qui feraient des dons de plusieurs milliers de dollars en bitcoins... si leurs followers leur donnaient seulement 1 000 dollars. Si la promesse de célébrités de donner des milliers de dollars en bitcoins semble trop belle pour être vraie, c'est certainement le cas. Dans ce genre d'attaque par ingénierie sociale, l'intuition et le bon sens peuvent être d'une grande aide. Méfiez-vous des offres qui vous font miroiter des cadeaux luxueux pour une fraction de leur valeur.

Restez protégé à tout moment avec **Avast One.**

Avast One offre une protection complète contre les liens suspects, les malwares, les violations de données, etc. Protégez l'ensemble de vos appareils et de vos données, bloquez les malwares et évitez les liens malveillants des spécialistes du phishing grâce à **Avast One**.

Téléchargez **Avast One Essentiel** gratuitement sur **avast.com/sciences**

Avast One

Un antivirus gratuit primé et une solution de protection avancée

+ Des outils de nettoyage pour améliorer les performances

+ Un VPN pour plus de confidentialité

PACK TOUT-EN-UN

Et n'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement sur mobile

Télécharger dans l'App Store

DISPONIBLE SUR Google Play

La sonde spatiale de la Nasa devrait être lancée le 5 octobre pour rejoindre Psyché, un astéroïde riche en métaux situé à plus de 400 millions de kilomètres de la Terre (vue d'artiste).

24K-PRODUCTION/SHUTTERSTOCK

Mission Psyché
Les richesses très convoitées des astéroïdes

Le mois prochain, une mission inédite va partir pour évaluer la possibilité d'exploiter les richesses minières d'un astéroïde. Depuis une dizaine d'années, plusieurs start-up développent des technologies pour explorer ce nouvel eldorado. Enquête.

Par Franck Daninos @fdaninos

« *Pour la première fois, nous explorerons un monde composé non pas de roche ou de glace mais essentiellement de métal.* » Telle est la motivation principale, annonce la Nasa, de sa mission Psyché, qui s'envolera le 5 octobre du Centre spatial Kennedy, en Floride (États-Unis), pour rejoindre l'astéroïde éponyme. Cet objet vagabonde à plus de 400 millions de kilomètres de notre planète, entre Mars et Jupiter, dans la bordure externe de la ceinture d'astéroïdes. Avec près de 230 kilomètres de diamètre pour une masse avoisinant les 20 millions de milliards de tonnes, c'est le plus gros astéroïde métallique identifié à ce jour. Il serait constitué principalement de fer et de nickel, mais aussi d'or, de palladium, de platine. Autant de métaux qui s'échangent à des dizaines de milliers de dollars le kilogramme… D'où l'emballement médiatique suscité par cette mission. En 2021, le magazine américain *Forbes* indiquait que Psyché pourrait rapporter 10 milliards de milliards de milliards de dollars, davantage que la richesse économique mondiale !

Cité par de nombreux médias, « *ce chiffre ne correspond à rien de sérieux,* objecte Guy Libourel, cosmochimiste à l'observatoire de la Côte-d'Azur. *Car personne ne connaît encore la composition précise de Psyché. Et surtout, parce que les technologies qui permettraient de miner un tel astéroïde sont pour l'heure hors de portée.* » Depuis une dizaine d'années, ▶

plusieurs start-up caressent néanmoins le rêve d'exploiter les richesses minières des astéroïdes. Créée en 2022 en Californie, la plus récente, dénommée AstroForge, est particulièrement audacieuse. Elle devrait lancer, elle aussi en octobre, une sonde spatiale visant à examiner un petit astéroïde supposément métallique orbitant à 30 millions de kilomètres de la Terre. « *Ce sera la première mission commerciale à survoler un astéroïde géocroiseur,* s'enflamme Matthew Gialich, P-DG d'Astroforge. *Alors que les ressources terrestres déclinent à un rythme rapide et que les pratiques minières actuelles causent des dommages irréversibles à notre planète, l'exploitation des astéroïdes est notre seule chance de maintenir nos modes de vie dans le futur* ».

Cette possibilité émergea d'abord dans les romans de science-fiction au tournant du XXe siècle. Dans *La Chasse au météore* (1908), Jules Verne imaginait ainsi les déchaînements de passion provoqués par la découverte d'un astre constitué d'or pur. Mais il faudra attendre une centaine d'années avant que les « *pépites volantes* » engendrent des velléités plus concrètes. Fondée en 2012 par le milliardaire américain Peter Diamandis, Planetary Resources devient alors la première entreprise privée à afficher pareilles ambitions. Avec le soutien financier du cinéaste James Cameron et du dirigeant de Google Larry Page, elle annonce développer des techniques visant à identifier des quantités importantes de métaux précieux dans des astéroïdes.

D'immenses bénéfices à la clé pour les start-up du spatial

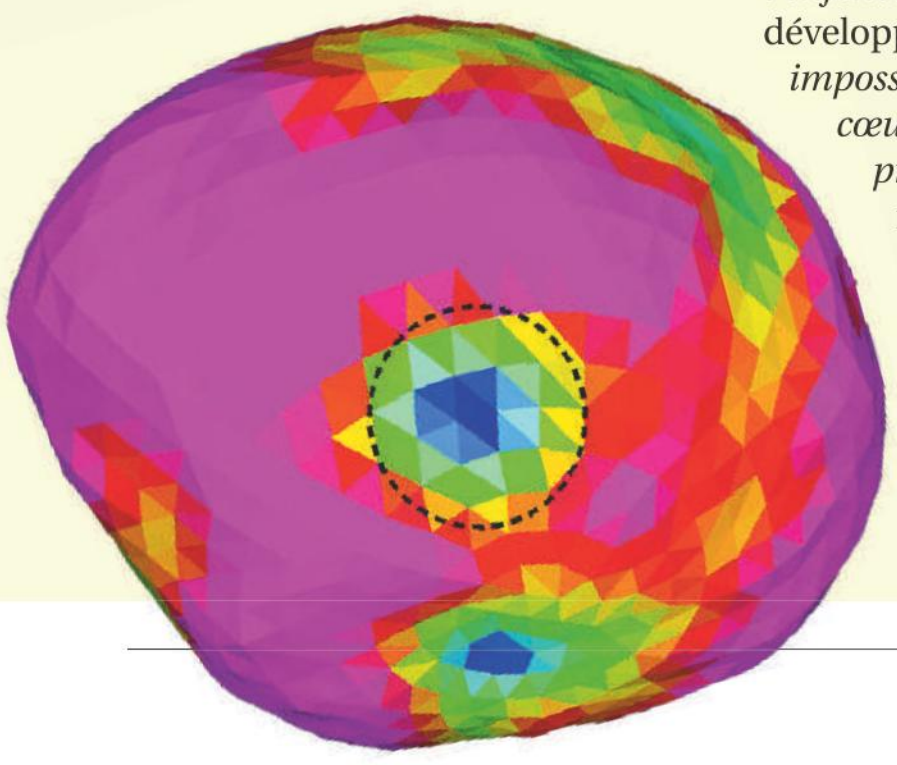
D'autres start-up naissent dans la foulée avec des aspirations similaires, telles l'américaine Deep Space Industries, la japonaise iSpace ou l'anglaise Asteroid Mining Corporation. Et en 2015, même si le traité de l'espace de 1967 interdit aux nations de revendiquer la propriété d'un corps céleste, les États-Unis autorisent leurs citoyens à « *s'engager dans l'exploration et l'exploitation commerciale des ressources spatiales* ». Un exemple suivi par le Luxembourg, les Émirats arabes unis ainsi que le Japon.

Pourquoi ce soudain enthousiasme ? C'est à l'orée des années 2010 que « *les préoccupations commencent à se répandre sur une série de matériaux qualifiés de critiques* », pose le physicien José Halloy de l'université Paris Cité. Indispensables pour une multitude de produits comme les smartphones, les implants médicaux ou les panneaux solaires, ces matériaux pourraient venir à manquer dès la seconde moitié du XXIe siècle du fait de leur rareté ou de faibles concentrations dans la croûte terrestre, alors que la demande mondiale est toujours plus élevée. Il s'agit notamment de semi-conducteurs comme le gallium et le germanium, des terres rares (néodyme, lanthane…) et des métaux du

COSMOCHIMIE

Quelle concentration de métaux dans l'astéroïde Psyché ?

Nommé selon la déesse de l'âme de la mythologie grecque, Psyché est « *un astre très énigmatique* », concède le cosmochimiste Guy Libourel. Les premières estimations pointaient une densité très élevée (7 g/cm³), suggérant que ce corps était composé exclusivement de métal. Il pouvait correspondre, ainsi, au noyau métallique d'une ancienne protoplanète dont le manteau aurait été arraché par des collisions. D'où la perspective, fascinante, « *d'accéder à un noyau planétaire où les matériaux les plus denses s'enfoncent et se concentrent,* développe le chercheur, *ce qui est impossible pour la Terre où ce cœur se situe à 2900 km de profondeur.* » Or, des mesures récentes montrent que la densité de Psyché n'atteint en réalité que 4 g/cm³. C'est certes davantage que les roches silicatées (3,2 g/cm³), trahissant des concentrations importantes de métaux confirmées en outre par la réflectivité radar, mais dévoilant une situation plus complexe. Pour l'expliquer, certains scientifiques estiment que Psyché serait composé d'un agrégat de blocs métalliques séparés d'espaces vides. D'autres, qu'il résulterait d'une zone de transition entre le manteau et le cœur d'une protoplanète. Et d'autres encore, qu'une série d'impacts aurait enrobé le noyau d'un « vernis » silicaté. Psyché pourrait même abriter un nouveau type de volcanisme, faisant remonter un alliage de fer et de soufre associé à des métaux précieux !



Topographie en couleur de Psyché (modélisation). Les dépressions sont saturées en rose.

SHEPARD ET AL., 2017

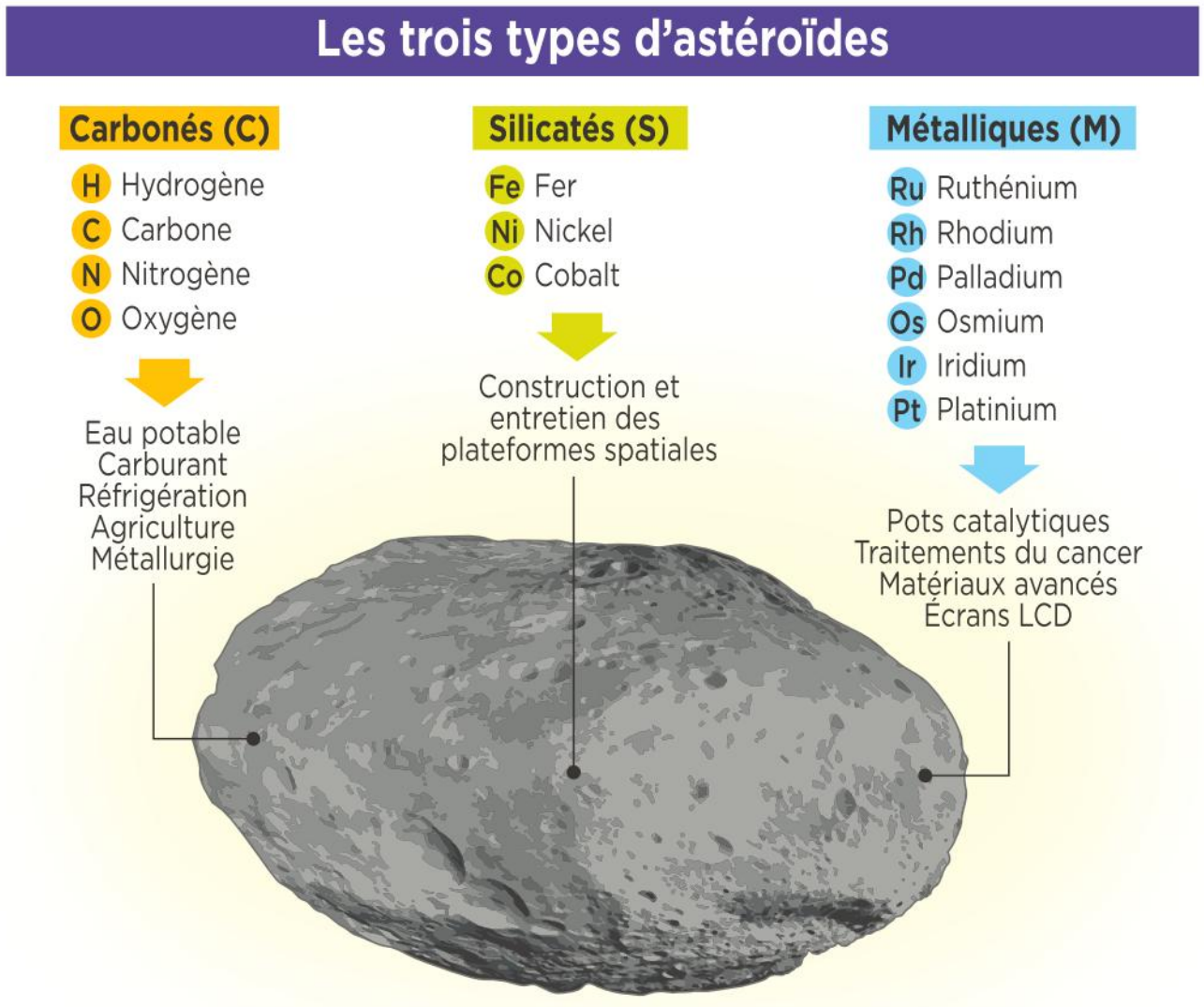
groupe des platines (rhodium, osmium, ruthénium, iridium, palladium, platine), le rhodium s'échangeant pour sa part à 150 000 euros le kilogramme. « *La réponse actuelle consiste à en trouver davantage, dans la croûte continentale voire les fonds océaniques, ce qui aggravera les problèmes environnementaux,* prévient José Halloy. *Une autre, inévitable à mon sens, serait d'en consommer moins ou d'inventer des matériaux aux propriétés analogues. Enfin, la plus inattendue et spéculative de toutes : tenter de les récupérer ailleurs que sur Terre, au sein des astéroïdes.* »

Des collectes de fragments essentielles pour les chercheurs

Le contexte est marqué également par l'essor du « New Space » à l'exemple de SpaceX et ses lanceurs bon marché. Les jeunes pousses du spatial prônent l'agilité, l'innovation technologique et la prise de risque. Avec, espèrent-elles, d'immenses bénéfices à la clé, comme le claironnent les premières start-up misant sur le minage des astéroïdes. Ces promesses sont alimentées, enfin, par d'ambitieux programmes scientifiques visant à mieux comprendre la nature et l'origine des astéroïdes, des objets formés en même temps que le Système solaire il y a 4,6 milliards d'années, mais qui n'ont pas pu s'agréger pour créer des planètes. Errant par millions dans la ceinture d'astéroïdes, ils constituent trois grandes familles : les corps carbonés (75 %), silicatés (17 %) et métalliques (8 %). Or, en 2014 et 2016 respectivement, les sondes Hayabusa-2 (japonaise) et Osiris-Rex (américaine) sont parties à la rencontre de deux astres carbonés riches en eau et en composés organiques pour collecter des fragments. La seconde devrait en rapporter 250 g le 24 septembre *(lire p. 8)*.

« *Ces missions ont permis d'éprouver des techniques de navigation, d'atterrissage et de collecte d'échantillons très instructifs pour ceux qui s'intéressent au minage* », indique Stéphanie Lizy-Destrez, de l'Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace à Toulouse. Mais elles ont révélé, aussi, que les astéroïdes présentaient des propriétés « *bien plus étranges et complexes qu'on n'imaginait* », souligne Patrick Michel, chercheur à l'observatoire de la Côte-d'Azur qui a participé à ces deux missions. Ainsi, lorsque Hayabusa-2 s'est approchée de sa cible, les opérateurs ont découvert des étendues aussi rocailleuses que chaotiques, rendant périlleuse toute manœuvre d'atterrissage, sans parler de l'installation d'un éventuel système de forage. Et quand le bras robotisé d'Osiris-Rex a touché le sol de l'astéroïde, il s'est enfoncé sur 50 cm sans aucune résistance, dévoilant une structure lâche et poreuse. « *Dans le vide spatial et à très faible gravité, la matière se comporte très différemment que sur Terre. Un bloc affleurant à la surface d'un astéroïde pourrait entièrement se désagréger dès qu'on le manipule* », relève Patrick Michel. On ne peut donc de se reposer sur les seuls savoir-faire et techniques de l'industrie minière, poursuit l'astrophysicien. « *L'objectif est certes pertinent : il est important de se préparer à exploiter ces ressources avant d'en avoir vraiment besoin. Mais les entrepreneurs que j'ai* ▶

Les trois types d'astéroïdes



Les matériaux présents dans les différents astéroïdes sont recherchés pour un grand nombre d'applications, de la fabrication des écrans LCD à la production d'eau potable.

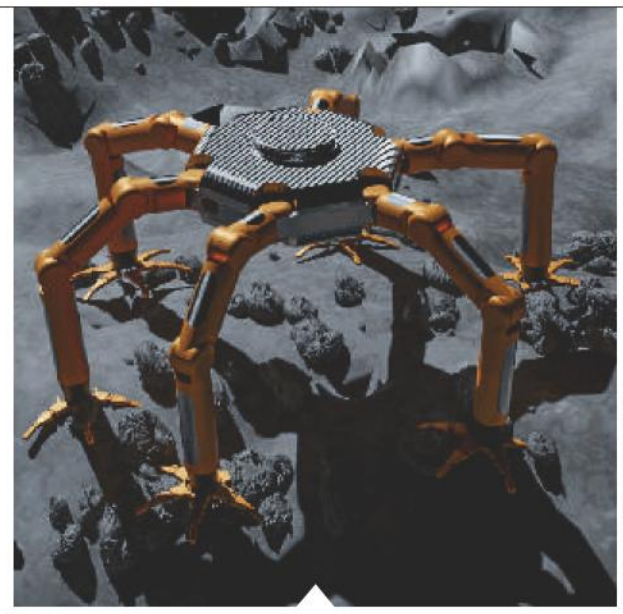
SOURCE : PLANETARY RESOURCES - INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

PATRICK MICHEL

« Dans le vide spatial et à très faible gravité, la matière se comporte très différemment que sur Terre »

Patrick Michel, astrophysicien, directeur de recherche CNRS à l'observatoire de la Côte-d'Azur

rencontrés sous-estimaient considérablement la tâche, brûlaient les étapes. Avec des projets irréalisables en l'état. »
Il faut du reste souligner que Osiris-Rex aura coûté 1,2 milliard de dollars. C'est, certes, une mission pionnière. « *Mais on n'est pas près de ramener des milliers de tonnes de minerai extraterrestre à un prix compétitif* », infère Guy Libourel. Ainsi, malgré des dizaines de millions de dollars injectés, Planetary Resources et Deep Space Industries se retrouvent en faillite dès 2019.
Fondées après ce fiasco, la chinoise Origin Space et l'allemande Karman+ changent de priorités. Ces start-up ne se concentrent plus sur les astéroïdes métalliques mais carbonés. Objectifs : extraire les molécules d'eau pour alimenter une station spatiale ou de futures missions habitées vers la Lune ou Mars ; et les dissocier en hydrogène et oxygène liquides afin de produire du carburant. Exploités sur place et non sur notre planète, ces astéroïdes serviraient ainsi de « *stations-service* » pour des voyages de longue durée ! « *Rien de simple, là encore. Mais cette perspective me paraît techniquement et économiquement plus réalisable* », juge Patrick Michel.
Asteroid Mining Corporation reste pour sa part focalisée sur les astéroïdes riches en métaux — ceux du groupe des platines notamment, où les concentrations seraient de 100 à 1000 fois plus importantes que dans la croûte terrestre. Consciente qu'une exploitation industrielle ne pourra se faire avant au moins plusieurs décennies, elle mise sur une approche « duale ». « *Il est aujourd'hui bien plus difficile qu'il y a dix ans de trouver des investisseurs* », confie Mickaël Laîné, professeur à l'université de Tohoku (Japon), qui pilote les travaux robotiques de cette start-up. Les logiciels et machines qu'il développe sont certes destinés au minage des astéroïdes, mais étant conçus pour fonctionner de façon autonome dans des conditions extrêmes, ils pourraient être utilisés « *aussi et à court terme dans des environnements terrestres dangereux : centrales nucléaires, zones sinistrées par des séismes, etc.* », détaille l'expert. Mobile, entièrement autonome et muni de crochets, un robot hexapode de 1,6 mètre d'envergure est ainsi en cours d'assemblage pour être commercialisé « *d'ici à trois ou quatre ans* ».


AMC / TOHOKU UNIVERSITY

Ce prototype de robot de 1,6 m est conçu pour évoluer dans des environnements hostiles, terrestres et spatiaux.

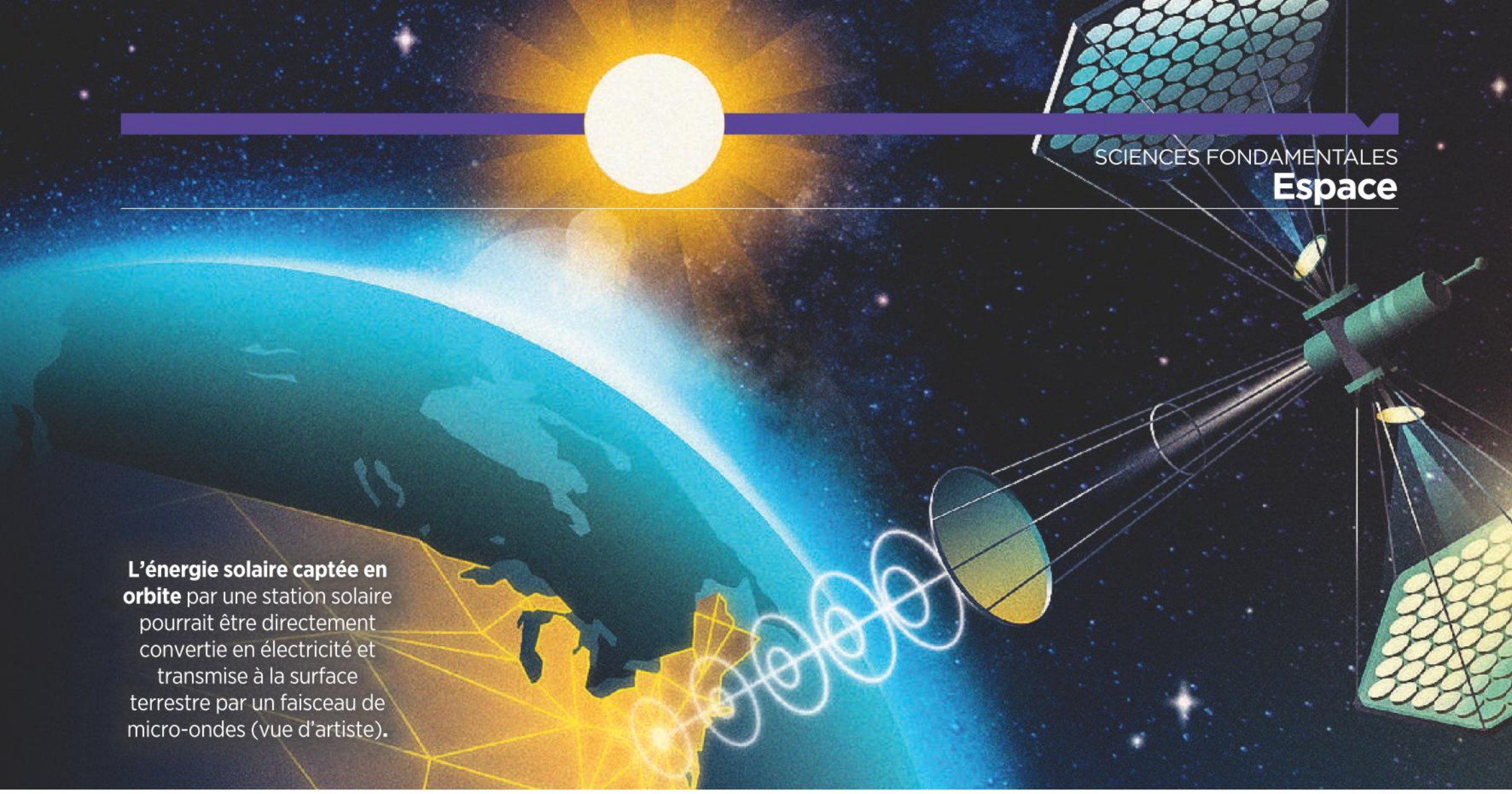
Une poignée de cibles potentielles

Mais avant d'envoyer la moindre machine dans l'espace, ces start-up devront surmonter le problème du ciblage : identifier les astéroïdes à la fois accessibles et présentant les bonnes compositions minéralogiques. Autrement dit… les perles rares ! Ils doivent d'abord ne pas être trop distants, pivoter trop vite autour d'eux-mêmes et filer surtout trop rapidement. « *Car leur vitesse détermine la quantité de carburant pour les rejoindre et donc la rentabilité d'une expédition* », signale Stéphanie Lizy-Destrez. En 2022, son équipe a établi une base de données (Ecocel) détaillant les trajectoires et fenêtres de tir d'ici à 2050 pour les 326 géocroiseurs les mieux documentés. « *Or parmi eux, seule une poignée serait des cibles potentielles* », conclut la chercheuse. La composition des astéroïdes représente un défi encore plus grand. Car depuis la Terre, les télescopes livrent des indications sur ce qui se trouve en surface, mais non au-dedans. C'est pour cette raison que la mission Psyché et ses instruments scientifiques intéressent tant les mineurs de l'espace. « *Elle fournira des informations cruciales sur la structure et les constituants des astéroïdes métalliques,* se réjouit Matthew Gialich. *Ce sera pour nous un immense pas en avant, une étape clé pour imaginer et exécuter les futures missions.* » ■

EXTRACTION

Tirer profit des ressources lunaires

Les premières ressources extraterrestres à être exploitées ne viendront probablement pas des astéroïdes mais de notre satellite naturel. Dans les années 2030, « *les futures bases habitées ne pourront être construites et alimentées avec des substances transportées depuis la Terre. Ce serait trop coûteux. Et politiquement indéfendable dans un contexte où les ressources terrestres s'amenuisent* », analyse l'astrophysicien Patrick Michel. Les matières premières devront donc être trouvées *in situ*. L'année dernière, l'ESA a mandaté ainsi l'entreprise franco-italienne Thalès Alenia Space pour développer une machine permettant d'extraire l'oxygène présent dans les poussières de la Lune. « *Le procédé repose sur une électrolyse à haute température et des sels fondus,* explique Roger Ward, directeur technique du projet. *Un prototype sera achevé en 2025, un modèle pour une mission lunaire en 2027.* » À terme, de tels engins pourraient générer des millions de tonnes d'oxygène, servant à la fois à faire respirer les astronautes et fabriquer du carburant. Outre l'oxygène, ils extrairaient aussi du fer, du titane ou de l'aluminium.



L'énergie solaire captée en orbite par une station solaire pourrait être directement convertie en électricité et transmise à la surface terrestre par un faisceau de micro-ondes (vue d'artiste).

IFP

La centrale solaire spatiale sort de l'ombre

Des chercheurs de l'institut américain Caltech sont parvenus à transférer vers la Terre un faisceau d'énergie électrique depuis un satellite équipé de panneaux solaires. Plusieurs projets de ce type sont à l'étude dans le monde, portés par l'avènement des lanceurs réutilisables et les avancées de la robotique.

En 1941, l'auteur de science-fiction Isaac Asimov imagine pour décor de sa nouvelle *Reason* une station solaire orbitale gérée par un robot récalcitrant. Cette idée d'installer des panneaux solaires dans l'espace a ensuite été explorée par les ingénieurs de la Nasa dès les années 1960. C'est précisément en découvrant ces travaux dans un article du magazine *Popular Science* que le riche entrepreneur américain Donald Bren comprend le potentiel de production d'énergie de cette solution. Persuadé que cela pourrait répondre aux défis à venir, il approche en 2011 le directeur du California Institute of Technology (Caltech) et fait un premier don à l'université américaine pour financer des recherches dans ce sens. Aujourd'hui son rêve n'est plus de la science-fiction.

En janvier, le Caltech a en effet mis en orbite, à 530 km d'altitude, un démonstrateur de mini-centrale solaire (le Space Solar Power Demonstrator ou SSPD-1) en vue de tester des technologies clés en environnement spatial. Financé par la Darpa, l'agence militaire américaine, ce petit satellite de 50 kg a réalisé le 3 mars la première transmission orbitale sans fil d'un faisceau d'énergie vers des récepteurs, situés à une trentaine de centimètres au sein du satellite. Ceux-ci l'ont ensuite converti en courant continu qui a permis d'allumer deux diodes LED. Le 22 mai, l'expérience a accompli une nouvelle première lorsqu'un faisceau focalisé de micro-ondes a été dirigé vers le toit d'un laboratoire du Caltech, à Pasadena. « *Le signal reçu est apparu à l'heure et à la fréquence prévues* », a indiqué Ali Hajimiri, chercheur en génie électrique, en charge de ce programme.

Le démonstrateur est composé de panneaux solaires qui alimentent un réseau d'émetteurs de micro-ondes. Grâce à des calculateurs électroniques miniatures, ces ondes sont concentrées par interférences constructives (elles s'ad-

TECHNOLOGIE

L'avenir est dans les panneaux solaires souples

RAPHAEL LU / ALUARTS.CH - ©ESTHER HUNZIKER INSIDE 2022

Le pavillon Novartis à Bâle (Suisse) est couvert de films photovoltaïques organiques qui alimentent des LED à la nuit tombée.

Pour réduire les coûts de mise en orbite de futures centrales solaires spatiales, il faudra drastiquement alléger le poids des cellules photovoltaïques. Les fermes solaires terrestres utilisent aujourd'hui des panneaux rigides et lourds. Ils sont finalement peu adaptés à une utilisation spatiale et pour couvrir la diversité des supports terrestres. Mais un nouveau procédé, le film solaire souple, pourrait à la fois s'imposer dans nos villes et à plus long terme dans l'espace. Loin de la prédominance de la Chine sur le marché des panneaux solaires classiques, des entreprises européennes aiguisent leur expertise dans ce nouveau domaine. Citons notamment les français Armor Group (Nantes) et Solar Cloth (Nice), l'allemand Heliatek ou le polonais Saule Technologies. Ces nouveaux acteurs ont développé des tissus de moins de 1 mm d'épaisseur, très légers et souvent transparents, voire autocollants, qui intègrent dans leur trame des cellules photovoltaïques. Ces nouveaux procédés ont été d'abord imaginés pour les voiliers autonomes, en vue de remédier aux accalmies. Mais ils peuvent aussi équiper des surfaces vitrées ou recouvrir des architectures complexes.

ditionnent) et destructives (elles se soustraient l'une de l'autre), et synchronisées afin que l'énergie soit focalisée sur la cible terrestre. Les systèmes testés étaient légers et souples, de manière à pouvoir être pliés pour réduire leur encombrement et leur masse au lancement. Le projet du Caltech prévoit en effet de lancer une constellation de panneaux souples comme des voiles solaires pliés en paquets de 1 m^3, qui, en orbite, se déploieront en carrés plats d'environ 50 mètres de côté. Ils seront constitués côté Soleil de cellules photovoltaïques et côté Terre d'émetteurs d'énergie sans fil. Une structure composite ultralégère de près de 2 mètres de côté devrait également être déployée en orbite dans les prochains mois, démontrant la faisabilité de cette architecture. Enfin, 32 cellules photovoltaïques de types différents sont en test afin d'évaluer leur performance et leur résistance dans l'environnement spatial.

Le Soleil, un immense réacteur à 150 millions de kilomètres

L'immense réacteur qu'est le Soleil transforme à chaque seconde 619 millions de tonnes d'hydrogène en hélium. Située à 150 millions de kilomètres de distance, notre planète intercepte en permanence une puissance totale de 174 000 térawatts (10^{12} watts) hors atmosphère et 122 000 TW au niveau du sol. Par comparaison, la consommation mondiale d'énergie était de 168 500 TW par heure en 2019 ! « *Un carré de 110 km de côté placé dans l'espace immédiat de notre planète suffirait à fournir l'énergie nécessaire aux activités humaines* », expliquait Daniel Lincot, spécialiste de l'énergie solaire et directeur de recherche émérite au CNRS, lors de sa leçon inaugurale au Collège de France, en janvier 2022. D'autant qu'une ferme solaire postée à une distance suffisante, typiquement sur l'orbite géostationnaire à 36 000 km, échapperait à l'ombre nocturne de la Terre et bénéficierait d'un ensoleillement permanent, quand les panneaux photovoltaïques

au sol pâtissent dans certaines régions, notamment aux hautes latitudes, d'une luminosité parcimonieuse.

Les premiers projets de centrales solaires orbitales ont été rapidement remisés car jugés trop coûteux, et donc non rentables. Mais l'avènement des lanceurs réutilisables — qui ont entraîné une diminution des coûts de mise en orbite — et les avancées de la robotique ont fait bouger les lignes dans plusieurs pays. Dont la Chine. En juin 2022, l'empire du Milieu a annoncé qu'une équipe de recherche de l'université de Xidian avait testé avec succès un récepteur terrestre de faisceau énergétique installé sur une structure en acier de 75 mètres de haut, un dispositif permettant de convertir l'énergie transmise en courant continu. D'autres projets sont à l'étude au Royaume-Uni, au Japon et en Corée du Sud.

SSPD/CALTECH

Le prototype de station solaire du Caltech (États-Unis) vu de l'intérieur. À droite, l'instrument de transmission d'énergie, à gauche, la diode électroluminescente (LED).

L'agence spatiale européenne sur les rangs avec Solaris

Lors du conseil interministériel qui s'est tenu à Paris en novembre 2022, l'agence spatiale européenne (ESA) a pris la décision de financer une première phase d'étude pour évaluer la faisabilité et la rentabilité d'un tel projet. Il y a tout juste quelques semaines, le 24 juillet, elle a confié cette étape à Thales Alenia Space, qui doit maintenant constituer un consortium industriel afin d'explorer les diverses solutions technologiques à mettre en œuvre. Dénommé Solaris, ce projet doit être réexaminé en 2025. *« Si à cette date la décision de lancer le programme est prise, notre feuille de route prévoit le vol d'un premier démonstrateur d'ici à 2030 »*, indique Sanjay Vijendran, chef du projet Solaris à l'ESA.

Plusieurs solutions technologiques sont explorées aujourd'hui, concernant par exemple le mode de transmission d'énergie : laser optique ou ondes radio ? *« Cette dernière méthode est la plus sûre et la plus efficace, car elle délivre l'énergie à une faible intensité et elle peut traverser l'atmosphère sans presque aucune absorption, quel que soit le temps »*, explique Sanjay Vijendran. Faut-il construire la station en orbite basse ou en orbite géostationnaire, à 36 000 km ? Cette dernière option est préférable pour le spécialiste européen, car elle permettrait une stabilité de positionnement par rapport à la zone de réception et d'éviter que les nombreux débris qui encombrent les orbites basses ne viennent endommager les panneaux solaires.

Ensuite, comment construire une structure gigantesque à des milliers de kilomètres de la Terre ? *« Il serait très difficile et coûteux d'envoyer des astronautes en orbite géostationnaire,* note Sanjay Vijendran. *Mais la robotique a beaucoup progressé au cours des cinquante dernières années : nous pouvons imaginer des flottes de robots autonomes opérant dans l'espace pour assembler une centrale solaire et l'entretenir, éventuellement avec une supervision ou une assistance limitée de la part d'astronautes.* » Peut-être faut-il aussi envisager de placer des stations relais en orbite. Bref, le champ des investigations est vaste. Mais, si elles ne sont pas encore suffisamment abouties pour être utilisées à grande échelle, toutes les briques technologiques nécessaires sont déjà en germe et devraient arriver à maturation dans la prochaine décennie.

Il faudra aussi régler le problème du recyclage d'une telle mégastructure. Les impératifs de durabilité ne seront pas atteints si tous les matériaux qui la constituent sont ensuite relégués sur une orbite cimetière ou brûlés dans l'atmosphère. Surtout, les puissants faisceaux d'énergie qui traverseraient l'atmosphère seraient-ils compatibles avec les autres applications spatiales et aériennes ? Quels dangers encourront les usagers de l'aviation et les oiseaux ? Ces sujets sont encore émergents. Reste que les efforts de recherche aujourd'hui déployés pourraient permettre demain de fournir de l'énergie à des bases lunaires ou martiennes. ■

Sylvie Rouat @srouat1

ESA

« Nous pouvons imaginer des flottes de robots autonomes opérant dans l'espace pour assembler une centrale solaire »

Sanjay Vijendran, chef du projet Solaris à l'ESA

Les robots mous explorent le corps humain

Le développement combiné de l'impression 3D et de nouveaux matériaux accélère les recherches en robotique molle. Ces structures aux capacités déformables sont particulièrement adaptées au contact du corps humain.

C'est un robot qui progresse sans membres, ni roues ni même de moteur. Il avance parce que le matériau dont il est fait réagit à la température : sur des cycles allant de 25 à 60 °C, cette structure gélatineuse composée d'un polymère thermosensible (Nipam), d'acrylamide, de nano-argile et d'eau, gonfle et rétrécit, provoquant sa mise en mouvement. Dévoilé fin 2022 dans la revue *Science Robotics*, ce curieux projet d'une équipe de l'université Johns-Hopkins (États-Unis) relève de la robotique dite molle. À savoir des entités artificielles dépourvues de matériaux rigides, dont les mouvements sont souvent inspirés de la nature (plantes, vers, insectes, fluides). Le domaine est en plein essor depuis les années 2010, grâce au développement combiné de nouveaux matériaux (mousses, polymères, hydrogels, élastomères à cristaux liquides…) et de l'impression 3D, laquelle facilite, techniquement et financièrement, la fabrication de prototypes.

Comme beaucoup de projets de ce genre, le « gelbot » de Johns-Hopkins n'est pour l'heure qu'une preuve de concept. Concernant le déplacement selon les variations de températures, mais pas seulement : *« Nous pouvons donner de l'intelligence à ce robot en cassant sa symétrie pour qu'il tourne d'un côté ou de l'autre,* explique David Gracias, du département de chimie et d'ingénierie biomoléculaire de l'université Johns-Hopkins. *Si nous souhaitons qu'il rampe sur la droite, nous pouvons manipuler en ce sens l'objet lors de sa fabrication et empêcher qu'il aille à gauche. Et* vice versa. » Cette approche n'est qu'un début. L'équipe envisage de

DAVID GRACIAS

« Nous pouvons donner de l'intelligence à ce robot en cassant sa symétrie pour qu'il tourne d'un côté ou de l'autre »

David Gracias, professeur au département de chimie et d'ingénierie biomoléculaire de l'université Johns-Hopkins (États-Unis)

l'adapter afin de faire réagir le gelbot à des biomolécules ou à des marqueurs de maladies dont la concentration évolue dans le temps. « *Cela permettrait au robot de bouger de manière autonome dans le cadre d'applications biomédicales.* » Car la santé et la médecine comptent parmi les usages privilégiés de la robotique molle.

Ces films en élastomère peuvent se déplacer très vite grâce à une connexion électromagnétique et à leurs deux « pieds » asymétriques. Ci-contre, simulation des différents étirements du film.

Des systèmes se déployant comme une plante grimpante

La première raison est évidente : ces appareils peuvent entrer en contact avec le corps humain (en particulier à l'intérieur) sans occasionner de dommages sur l'anatomie. Huit mois avant le « *gelbot* », une équipe de l'université de Hong Kong présentait une étrange structure visqueuse constituée de polymère, de borax (un minerai de bore) et de particules de néodyme, un métal. Contrôlé par un aimant, ce robot mou se contracte, s'étire et se glisse dans les espaces les plus étroits, agrippe des objets. Une structure idéale pour « *la chirurgie mini-invasive, la micromanipulation et l'administration ciblée de médicaments* », selon l'article de recherche publié dans *Advanced Functional Materials*.

L'endoscopie, en particulier, suscite divers projets consistant à rendre les câbles plus flexibles et contrôlables, grâce à des tubes déformables, des systèmes gonflables ou encore des « vine robots » (robots vigne) qui se déploient comme une plante grimpante. L'intérêt de ce dernier concept réside dans ce qu'il ne touche pas les organes dans lesquels il progresse. « *Dans le cadre d'une coloscopie, cela évite de faire migrer des cellules cancéreuses en les arrachant au passage du robot et de les propager quand on le retire* », relève Christian Duriez, directeur de recherche à l'équipe Defrost (université de Lille, Inria, CNRS, Centrale Lille) sur les robots déformables, terme que le chercheur préfère à celui de « mous ». Mieux : un autre type de conception, celle des tubes concentriques, limite les contacts avec un organe. Il s'agit de tubes très fins insérés les uns dans les autres, chacun avec des courbures différentes. Si l'on enfile un tube d'une certaine courbure dans un autre doté d'une courbure opposée, l'ensemble devient droit. Si on aligne les deux courbures, le robot redevient courbe. Autrement dit, il est possible de diriger la structure. « *On use de courbures et de rigidités différentes selon l'endroit à explorer, avec par exemple, à l'extrémité du tube, une caméra,* explique Christian Duriez. *Cela peut servir dans des zones de l'anatomie que l'on ne souhaite pas toucher, comme les fosses nasales.* »

On le voit, toutes ces applications exigent un certain niveau de miniaturisation. C'est le deuxième grand intérêt de la robotique molle *(lire l'encadré ci-contre)*. La preuve avec un prototype de bronchoscope en élastomère dévoilé en avril 2022 par le Storm Lab de l'université de Leeds (Royaume-Uni). D'un diamètre de 2 mm, deux fois moindre que celui des appareils conventionnels, il peut explorer des ramifications des bronches jusque-là inaccessibles. ▶

GUOYONG MAO ET AL./NATURE COMMUNICATIONS AUGUST 2022

MÉTHODE

Miniaturiser grâce à la « morphologie computationnelle »

En robotique molle, le corps du robot s'adapte de lui-même à l'environnement, et non parce qu'il est commandé par une unité de calcul centrale. C'est ce que l'on appelle la morphologie computationnelle. Comme quand une boule flexible en silicone devient préhensible au contact d'un objet rigide.
« *La morphologie computationnelle est particulièrement intéressante pour les robots de taille réduite*, estime Helmut Hauser, spécialiste de la question à l'université de Bristol (Royaume-Uni). *Assembler des minirobots n'a rien d'évident, il est donc très pratique d'avoir des éléments qui peuvent tout à la fois s'activer, capter et calculer.* »

APPLICATIONS

Un exosquelette souple avec des muscles artificiels

En 2019, la société ReWalk Robotics, fabricant d'exosquelettes pour les membres inférieurs du corps humain, a obtenu le marquage CE pour le ReStore Exo-Suit, un appareil d'un nouveau genre destiné à la rééducation des patients après un accident vasculaire cérébral (AVC). Il découle d'une collaboration avec l'institut Wyss, un laboratoire spécialisé en robotique bio-inspirée de l'université Harvard (États-Unis) dont les travaux visent des usages médicaux. Loin de l'armature lourde et rigide typique des exosquelettes, l'Exo-Suit est fait de matériaux souples qui épousent la forme des muscles et des tendons et en imite l'action, de la hanche à la voûte plantaire. Les chercheurs ont étudié au préalable la biomécanique de la marche pour qu'un ensemble de capteurs souples, d'actionneurs et de câbles animent la structure, stimulant les articulations et les muscles du porteur. Les travaux en robotique molle de l'institut comptent également un gant en élastomère qui restitue la fonction de préhension de la main, une enveloppe en silicone faite pour stimuler le cœur ou encore un alliage à mémoire de forme servant à compenser des atrophies musculaires.

WYSS INSTITUTE

La structure flexible stimule les articulations et les muscles dans le cadre d'une rééducation après un AVC.

▶ Des particules métalliques intégrées dans le matériau servent à guider l'appareil depuis l'extérieur du corps par un champ magnétique.
Des chercheurs de l'université de Linz (Autriche) ont, eux, conçu un robot en films d'élastomère de 9 mm sur 9 mm. Ils ont réussi à le faire bondir par une force électromagnétique : un courant électrique est envoyé au travers d'un fil de cuivre dans des canaux de métal liquide insérés dans l'élastomère. Le robot avale alors en une seconde une distance de 70 fois sa propre taille. Là encore sont envisagés des usages médicaux. En théorie du moins. « *Ce n'est encore qu'un concept, le design actuel ne fonctionnerait pas en l'état dans un corps humain, qui demande des modifications selon l'environnement, par l'exemple l'estomac* », précise Guoyong Mao, membre de l'équipe. D'autres designs sont en cours d'étude, justement en regard d'applications précises. Mais le but premier du projet est de montrer ce qu'il est possible de faire à une échelle si réduite. « *Notre robot est plutôt simple, mais si vous décidez de fabriquer quelque chose de taille millimétrique avec des moteurs électriques et un système de transmission, cela risque d'être bien plus difficile.* »

S'adapter aux imperfections et aux marges d'erreur

Les perspectives médicales de ces recherches s'expliquent par une troisième raison, *a priori* paradoxale : la robotique déformable s'avère moins précise que des machines conventionnelles. « *Les robots rigides ont été conçus dans les années 1970 dans l'industrie pour des tâches très bien définies dans l'espace absolu,* note Christian Duriez. *Mais si vous voulez un robot qui suive le mouvement du foie d'un patient, le référentiel n'arrête pas de bouger et un appareil rigide n'est pas pratique.* »
Une structure souple est bien plus adaptée. Dans cette logique, un article de juillet 2022 de l'équipe Defrost, en collaboration avec l'université de Naples (Italie), a démontré, en simulation, la faisabilité d'un robot d'un nouveau genre destiné à la biopsie transrectale de la prostate. L'appareil combine des parties rigides et souples lui permettant de coller aux micromouvements involontaires du patient — qui n'est pas anesthésié — sans causer de lésions.
Cette faculté à jouer sur le positionnement relatif brouille parfois les frontières entre robot, muscle artificiel et prothèse, comme en attestent plusieurs projets de l'institut Wyss de l'université Harvard aux États-Unis *(lire l'encadré ci-contre)*. La vocation de la robotique molle apparaît là pleinement : savoir s'adapter à tout ce que le vivant comporte d'imperfections et de marges d'erreur. Le corps humain est certes une belle machinerie, il ne sera jamais, lui, un robot. ■

Arnaud Devillard

35 SCIENTIFIQUES PARTICIPENT À CE NUMÉRO

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE

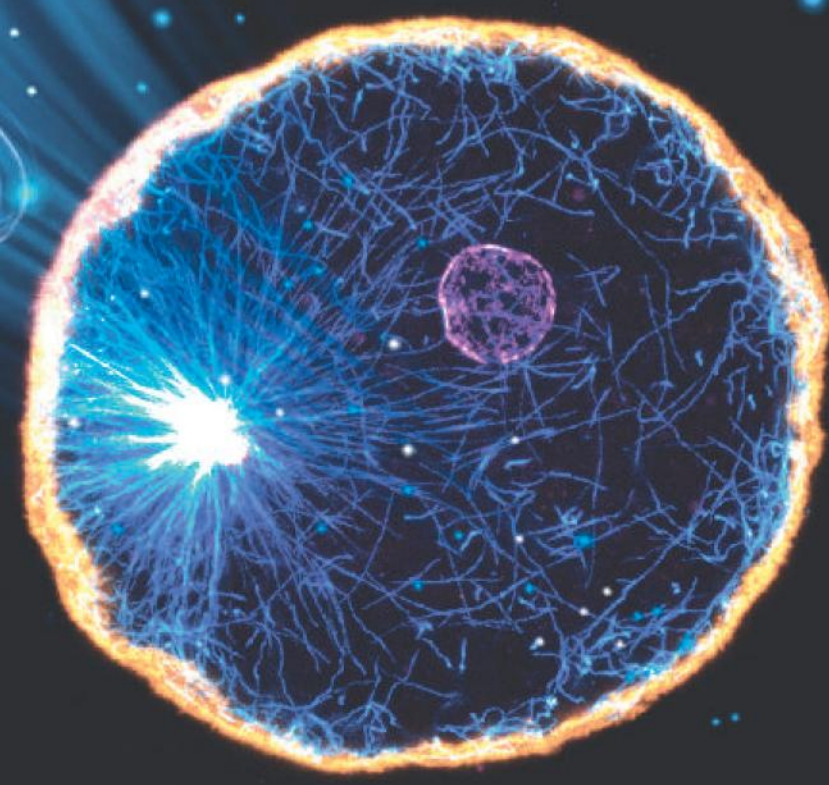
Alain Fischer
Président de l'Académie des sciences
LA CULTURE SCIENTIFIQUE AU CENTRE DU DÉBAT
p.6

Rosa Cossart
Neuroscientifique, Marseille
LES INTERNEURONES, NOUVEAUX CHEFS D'ORCHESTRE DU CERVEAU
p.92

La Recherche

LE MAGAZINE DE RÉFÉRENCE SCIENTIFIQUE - JUILLET / SEPTEMBRE 2023 - 9€90

L'INFINIMENT PETIT



- Quand l'Univers était minuscule
- Au-delà des quarks et des gluons
- La simulation quantique
- Des pinces pour étudier l'ADN
- Voir le détail des cellules
- Nanoparticules et santé
- Processeurs : miniaturiser jusqu'où ?

p.16

Astrophysique
LE CIEL INFRAROUGE AVEC LE JAMES-WEBB
p.78

Fertilité
LA BIOPHYSIQUE DES OVOCYTES
p.122

Environnement
SAUVER LA NUIT
p.100

Archéologie
LES MÉGALITHES D'ÉTHIOPIE
p.114

Science et fiction
L'IA, POUR LE MEILLEUR ET POUR LE PIRE
p.140

Chez votre marchand de journaux

148 pages
MAGAZINE-LIVRE
Trimestriel

GRAND OCEAN

ATHENA COUSTENIS
ASTROPHYSICIENNE

Y a-t-il de la vie dans les océans du Système solaire ?

L'astrophysicienne Athena Coustenis expliquera le 30 septembre, lors du festival Grand Océan à Cherbourg, pourquoi les missions spatiales destinées à sonder les océans du Système solaire pourraient être cruciales pour notre compréhension des mécanismes conduisant à la vie. Entretien.

« *Qu'on y trouve une vie primitive, des microbes, des micro-organismes, des macromolécules ou qu'on ne trouve rien du tout, ce sera une information essentielle !* » Telle est la vision de l'enthousiaste astrophysicienne Athena Coustenis qui interviendra durant la 2e édition du festival Grand Océan, les 29 et 30 septembre à la Cité de la mer à Cherbourg, lors de la session « Des océans dans l'espace ». Dans le voisinage de la Terre, au cœur du Système solaire, sous la glace des satellites des planètes géantes Jupiter et Saturne se cachent en effet des volumes gigantesques d'eau liquide. Quel secret peut-elle receler ? La question est au cœur des missions spatiales les plus actuelles, qu'il s'agisse de Juice, la sonde lancée en avril par l'agence spatiale européenne (ESA) et devant se mettre en orbite autour de Ganymède en… 2034. Ou encore d'Europa Clipper et Dragon-Fly de la Nasa, dont les lancements sont prévus en 2024 et 2027. Athena Coustenis a répondu aux questions de *Sciences et Avenir* sur ces mondes mystérieux. Terres avant la vie, ou avec vie ?

A. COUSTENIS

Athena Coustenis est directrice de recherche CNRS à l'observatoire de Paris-PSL. Co-investigatrice de la caméra Janus sur la mission Juice, elle a reçu la médaille Jean-Dominique Cassini en mai 2023 de l'Union européenne des géosciences.

Depuis quand sait-on qu'il y a des océans ailleurs que sur Terre ?
C'est avec les missions Voyager vers Jupiter et Saturne, à la fin des années 1970, qu'on a découvert la présence d'océans sur les lunes de ces planètes géantes, même si les images renvoyées par les sondes étaient de résolution assez faible — 2 kilomètres par pixel. Aujourd'hui, les orbiteurs sont capables de voir des détails de quelques mètres seulement ! Ainsi, la surface d'Europe est apparue bien plus brillante que ce qu'on imaginait, et on l'a vite comparée à l'Antarctique. Autour de Ganymède, a été détecté un champ magnétique caractéristique de la présence d'une couche conductrice de l'électricité, certainement de l'eau liquide. Plus récemment, dans les années 2000, grâce à la mission Cassini, ce sont les fameux geysers d'Encelade qui ont été découverts. Quant aux mesures de gravité sur Titan, elles ont avéré l'existence d'un océan souterrain.

Est-ce que ces océans sont identiques ?
Il en existe de deux catégories. Ceux d'Europe et d'Encelade, dont les poches de liquide très proches de la surface sont également en contact avec les roches (silicates) à l'intérieur des satellites. Ces conditions les rapprochent de celles des océans terrestres, avec leurs sources hydrothermales… D'autre part, il y a

NASA/ESA/K. RETHERFORD/SWRI

Des geysers ont été détectés sur Europe, une des lunes de Jupiter, qui abrite un océan sous sa surface glacée (vue d'artiste).

Titan et Ganymède, dont les océans sont piégés entre deux couches de glace très épaisses. La question se pose alors de savoir si ces océans, coincés par en dessous par la glace et n'étant pas en contact direct avec les silicates, présentent également des éléments organiques.

Pourquoi ces missions spatiales sont-elles si importantes ?

Il ne s'agit pas seulement d'aller chercher la vie, mais déjà de comprendre la vie ! Toutes les études dont on dispose sur Ganymède montrent que ses océans contiennent du sel. Comme sur Terre, où le sel de l'océan provient du frottement de l'eau avec les silicates… Et depuis plus de vingt ans, on s'interroge sur le fait de savoir si la vie vient des sources hydrothermales, et quelle est l'importance du processus dit de serpentinisation [favorisant la catalyse de certaines réactions chimiques], dont certains pensent qu'il est à l'origine de l'apparition de la vie. Ces missions jouent le rôle d'éclaireuses pour des missions ultérieures avec retour d'échantillons, qui pourraient permettre de voir comment surgissent à un moment des acides aminés, des macromolécules qui conduisent à la vie. Ces maillons-là de compréhension nous manquent. On pourrait les trouver sur ces autres objets célestes.

En quoi la mission Juice est-elle originale ?

C'est la première fois qu'une mission a pour but de mettre une sonde en orbite autour d'un satellite des planètes géantes. En l'occurrence Ganymède, le plus gros satellite du Système solaire, dont on va étudier l'étendue, la profondeur, et donc peut-être aussi la composition de l'océan. Et ce, avec une dizaine d'instruments dédiés : radar, magnétomètre, détecteur de particules, caméras dans le visible et l'infrarouge, caméra visible à champ étroit Janus, dont je suis co-investigatrice. Notons que les scientifiques français sont présents sur plus de la moitié de ces instruments. On espère enfin identifier des régions où la couche de glace est la plus fine possible. Ce qui permettra ultérieurement de la percer et d'aller voir à l'intérieur de l'océan.

Quelle future mission vous tente le plus ?

Pour se poser, forer, récupérer des carottes et ramener des échantillons, c'est Encelade qu'il faut viser. Ce n'est pas un hasard si la Nasa a décidé qu'après Uranus, sa deuxième grande mission sera justement vers cette lune de Saturne. Si l'Esa et la Nasa s'associent, cela donnera une superbe mission. ■

Propos recueillis par Dominique Leglu

@dominiqueleglu

LE PROGRAMME DE GRAND OCÉAN 2

Deux journées de rencontres

29 SEPTEMBRE

▸ **Après-midi.** Ouverture avec la déclaration de Grand Océan par plusieurs « sages » : Françoise Gaill, Bruno David, Michel L'Hour… Dialogue avec le prince Albert II de Monaco et Romain Troublé (Fondation Tara).

30 SEPTEMBRE

▸ **Matinée.** L'océan vu de l'espace. Comment évolue le Gulf Stream ? Robotique : à la découverte de trésors archéologiques, d'écosystèmes inconnus.

▸ **Après-midi.** Moby Dick, la gorgone Méduse, les monstres marins… vus par plusieurs historiens. Les océans du Système solaire. Les animaux invisibles et la mission Bougainville. Santé : les médicaments issus de l'océan. Écologie : comment décarboner le transport maritime.

▸ **Détails et inscription gratuite :** www.grandocean-event.com

PATRICK LANDMANN/SPL/SUCRÉ SALÉ

Pour collecter les individus et effectuer leur recensement, les scientifiques utilisent différentes méthodes, comme ici un piège lumineux avec un drap blanc déployé de nuit, dans la forêt tropicale près du lac de Petit-Saut, en Guyane française.

Insectes
Aux sources de leur vertigineux déclin

Destruction des habitats, pesticides, changement climatique… Les insectes sont soumis à une épreuve d'autant plus rude qu'ils sont aussi menacés par l'arrivée d'espèces invasives. Les programmes de science participative se multiplient pour prévenir la disparition de ces gardiens de la biodiversité.

Par Fanny Costes

Une chute de 76 % de la biomasse d'insectes volants en vingt-sept ans : telle est l'estimation de la Société d'entomologie de Krefeld, en Allemagne, dans une étude publiée en 2017 dans la revue scientifique *Plos One*, et aujourd'hui considérée comme une référence. Ses résultats sont si accablants qu'ils ont suscité de nombreuses autres recherches et publications pour vérifier l'ampleur du déclin. En 2019, une autre étude allemande, dirigée par Sebastian Seibold de l'Université technique de Munich, a ainsi conclu qu'entre 2008 et 2017, les prairies allemandes avaient perdu en moyenne les deux tiers de leur biomasse d'arthropodes (insectes, araignées, cloportes…) et les forêts avaient vu cette même biomasse diminuer de 40 %. D'autres études menées en Europe ont abouti au même constat. De l'autre côté de l'Atlantique, l'entomologiste américain Bradford C. Lister, qui avait échantillonné les insectes présents dans la forêt de Luquillo à Porto Rico en 1976 et 1977, a constaté pour sa part une diminution allant de 75 à 98 % de la biomasse d'insectes et araignées capturés entre 2011 et 2013.

Pour l'Afrique, l'Amérique du Sud, l'Asie ou encore l'Océanie, des zones très riches en insectes, les connaissances demeurent lacunaires. *« Il n'y a pas de raison de penser que cela se passe mieux ailleurs, mais sans preuve on ne peut pas affirmer que le déclin des insectes est généralisé à l'échelle de la planète,* admet Colin Fontaine, chercheur au Centre d'écologie et des sciences de la conservation du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris. *En revanche, les signes d'un déclin fort et* ▶

PHILIPPE HUGUEN / AFP

L'usage massif des pesticides est une cause avérée de l'effondrement des populations d'insectes à proximité des zones agricoles.

touchant une majorité d'espèces sont nets partout où l'on a des données. »
« *Cela ne veut pas dire que certains taxons, à l'inverse, ne vont pas augmenter,* souligne Cécile Le Lann, maître de conférences et écologue au sein du laboratoire Ecobio de l'université de Rennes. *Il en est ainsi de certaines espèces exotiques qui peuvent devenir invasives, tel le moustique-tigre.* » Cela se produit à la suite d'une importation humaine, à l'instar de ce qui s'est passé pour le frelon asiatique, probablement arrivé dans des poteries rapportées en France depuis la Chine ; ou à la faveur d'une évolution de l'aire de répartition consécutive à l'augmentation globale des températures — il en est ainsi de la chenille processionnaire, qui migre d'une cinquantaine de kilomètres vers le nord par décennie.
Pour compter les insectes, les entomologistes et autres scientifiques s'appuient sur des techniques éprouvées, à commencer par le piégeage. « *Le piégeage lumineux, "light trap", est très efficace pour attirer papillons de nuit, cousins, moucherons ou espèces de coléoptères,* décrit Mathieu Leclerc, doctorant au sein de l'Institut de recherche sur la biologie de l'insecte de Tours. *Pour capturer mouches, guêpes et autres individus volants et sauteurs, on fait appel aux tentes Malaise, dotées d'une paroi centrale contre laquelle viennent taper les insectes pour ensuite tomber dans un récipient d'alcool permettant leur conservation.* »
Pour les fourmis, cloportes ou limaces du sol, la méthode la plus utilisée est le piège Barber, un récipient à parois lisses, enfoncé dans le sol, dont le fond est généralement rempli d'une solution sucrée pour attirer et conserver les espèces piégées. Sans oublier les filets fauchoirs utilisés afin de capturer criquets, grillons ou punaises dans les zones herbeuses, les arbres, les arbustes ou le maquis. « *Et bien sûr, il existe des méthodes de comptage non invasives,* poursuit Mathieu Leclerc. *Les observateurs peuvent définir un transect, un segment à parcourir en bordure d'une culture ou en forêt par exemple, et compter le nombre d'individus qu'ils voient se déplacer en marchant sur une distance donnée. On peut aussi, pour les libellules, compter le nombre de mues sur une berge.* »

L'urbanisation et l'agriculture intensive pointées du doigt

Les causes de la perte générale de la biodiversité ? « *Elles sont bien connues : destruction des habitats, pesticides ou changement climatique,* rappelle Colin Fontaine. *Mais il peut être difficile de discriminer une cause par rapport à une autre.* » Les scientifiques s'attellent donc le plus souvent à étudier un, deux ou trois facteurs de stress puis à les croiser. « *C'est l'objet d'expériences en laboratoire. Nous prenons les insectes d'une espèce et nous les soumettons par exemple à des vagues de chaleur, lesquelles sont amenées à se multiplier, à s'intensifier et à se prolonger dans les années à venir* », raconte Mathieu Leclerc. En 2021, des chercheurs du département de biologie de l'université de Caroline du Nord (États-Unis) ont publié des résultats très parlants. Dans le cadre d'une expérience, ils ont placé des larves du sphinx du tabac, *Manduca sexta,* dans des chambres climatiques. Un premier

ALLILI MOURAD/SIPA ; DANIEL HEUCLIN / NATURAGENCY

Ces espèces invasives (chenilles processionnaires du pin et moustique-tigre) progressent en Europe, perturbant les écosystèmes.

LUIS CASIANO/NATURAGENCY

Les abeilles jouent un rôle essentiel dans la pollinisation. Leur déclin fragilise la reproduction des plantes.

groupe a été exposé à un cycle diurne de 25 ± 10 °C, avec deux heures à la température maximale de 35 °C et deux heures à la température minimale de 15 °C. Un deuxième groupe a, lui, été exposé à plusieurs vagues de chaleur de trois jours consécutifs, avec une température maximale de 42 °C et la même température minimale. Résultat : *« La survie à la nymphose [passage de la larve à la nymphe] a diminué avec l'augmentation du nombre de vagues de chaleur. Le développement et la masse des nymphes se réduisent »*, rapportent les auteurs de l'article. *« Ensuite, on croise les facteurs, en exposant une espèce à des pesticides, à une réduction de la quantité de nourriture et à une vague de chaleur par exemple,* détaille Mathieu Leclerc. *Cette expérience a notamment été conduite sur des insectes aquatiques — des larves de libellules — chez qui on a observé une diminution des protéines HSP, qui aident notamment à lutter contre les canicules. Les insectes exposés aux pesticides sont donc encore moins tolérants aux vagues de chaleur que les insectes non exposés. »*

En Europe, les facteurs figurant en tête des causes de surmortalité demeurent l'agriculture intensive et l'urbanisation, selon une méta-analyse publiée en 2019. *« Parmi les coléoptères, les lépidoptères et les hyménoptères, le changement d'affectation des terres et la fragmentation du paysage sont sûrement la principale cause du déclin des espèces, la conversion agricole et l'intensification pour la production alimentaire étant répertoriées dans 24 % des rapports. L'urbanisation est signalée dans 11 % des cas, tandis que la déforestation apparaît dans 9 % des déclarations »*, précisent les auteurs. Reste que les effets du changement climatique sont appelés à s'intensifier et donc à soumettre les insectes déjà fortement fragilisés à des phénomènes extrêmes. Les hivers plus chauds inquiètent notamment. Pour surmonter la rigueur des températures hivernales, de très nombreux insectes de l'hémisphère Nord comme les fourmis, les coccinelles, les moustiques ou les papillons se mettent normalement en diapause, un état métabolique complètement ralenti. À l'automne, ils accumulent donc des réserves énergétiques et quand la réduction des jours s'associe à une diminution assez nette des températures, ils se mettent à l'arrêt ou presque. *« Avec des hivers plus chauds, nombre d'insectes n'entrent plus en diapause et sont donc actifs durant cette saison,* note Cécile Le Lann. *On pourrait se dire : tant mieux pour eux, ils vont pouvoir se développer. Mais quand ils sont actifs l'hiver, ils sont exposés aux vagues de froid auxquelles ils risquent de succomber. À l'inverse, des montées rapides en température font que les abeilles, par exemple, vont rapidement perdre leur eau et avoir un métabolisme très accéléré. Même si elles survivent, leur espérance de vie sera moins longue et elles se reproduiront moins. »*

Un autre sujet qui retient l'attention des scientifiques est le décalage entre l'activité des végétaux et celle des insectes. Or, si l'insecte ne suit pas le rythme de la plante, il risque de ne plus trouver de quoi se délecter, et la plante, elle, ne pourra plus être pollinisée et donc se reproduire. Une expérience menée par des biologistes de l'université de Califor-

POUR EN SAVOIR PLUS

À lire
Terre silencieuse. Empêcher l'extinction des insectes, Dave Goulson, Éditions du Rouergue, 23,80 €

Web
Le programme Spipoll : www.spipoll.org

PRATIQUES

6 astuces pour protéger la biodiversité des insectes dans son jardin

1. Réduire la fréquence des tontes et laisser « mauvaises » herbes et herbes hautes pousser sur les bordures des jardins. Cela permet de créer un habitat protecteur pour nombre d'insectes qui y trouveront un microclimat aux températures basses ou élevées moins extrêmes.
2. Planter des fleurs riches en nectar et en pollen : phacélie, bourrache, lavandin, romarin, thym, tournesol…
3. Planter des arbres fruitiers, même en pot sur une terrasse ou un balcon.
4. Éviter les pesticides et laisser les coccinelles ou larves de syrphes lutter contre les nuisibles.
5. Creuser une mare, même petite de la taille d'un évier.
6. Privilégier les haies et arbustes aux claustras en bois, en aluminium ou en plastique.

SCIENCE CITOYENNE

Suivre les insectes pour mieux les conserver

GILLES MARTIN / BIOSPHOTO

Les sciences participatives sont une autre manière de freiner le déclin des insectes. Lancé en 2010 par le Muséum national d'histoire naturelle (MNHN), le programme Spipoll (Suivi photographique des insectes pollinisateurs) invite ainsi le grand public à photographier et partager les images d'insectes observés sur un lieu et une plage de temps donnés. Les participants choisissent une plante, une fleur, une zone d'herbe, et pendant vingt minutes ils vont photographier tous les insectes qui viennent butiner ou sont de passage. Puis ils trient leurs images, donnent un nom à chaque insecte photographié et les partagent sur une plateforme dédiée où les photos sont visibles de tous. *« Ensuite, la communauté des participants valide les identifications ou corrige les erreurs. Il n'y a pas besoin d'être un connaisseur. Si on se trompe, d'autres vont corriger derrière,* explique Colin Fontaine, chercheur au Centre d'écologie et des sciences de la conservation du MNHN. *Cela permet donc de produire des données très utiles à la science. Surtout, les citoyens participants prennent conscience des insectes et de leur diversité. Or c'est nécessaire, car on ne fournira pas les efforts suffisants pour conserver ce qu'on ne connaît pas. À partir du moment où on peut les identifier, les différencier, tout à coup, ils se mettent à exister. »*

nie (États-Unis) en 2022 a ainsi démontré que le réchauffement a avancé le début, le pic et la fin de la floraison de trois plantes herbacées annuelles à floraison printanière, mais n'a pas modifié l'émergence d'*Osmia lignaria*, l'abeille solitaire qui les visite. Conséquence : *« Les communautés végétales réchauffées produisaient des fleurs moins nombreuses et plus petites avec moins de nectar, ce qui réduit l'attractivité pour les abeilles ensuite. »* Seuls certains insectes dits généralistes peuvent plus facilement s'adapter car ils ne dépendent pas d'un petit nombre de végétaux. C'est le cas des abeilles domestiques qui peuvent butiner tour à tour chaque fleur qui se présente à elles, depuis le colza en avril-mai jusqu'à la féverole. Mais pour les insectes dits spécialistes, le danger est réel.

Malgré les menaces qui pèsent sur eux, la plupart des insectes restent souvent considérés comme des nuisibles. *« Écologistes et entomologistes, nous devrions tous nous sentir profondément inquiets de ne pas avoir su expliquer au grand public l'importance vitale des insectes »*, lance le biologiste britannique David Goulson dans son récent ouvrage *Terre silencieuse*. Car les insectes sont des êtres déterminants pour l'équilibre de nos écosystèmes. Sans eux, peu de plantes pollinisées. Sans collemboles, cloportes ou mouches, pas de dégradation de débris végétaux et organiques et donc des sols appauvris aux rendements toujours plus réduits. Et sans plantes, moins d'oxygène produit et des concentrations de CO_2 toujours plus élevées. Sans les insectes aquatiques et surtout leurs larves, comme celles de simulies, pas de filtration des eaux (débris, microalgues…) et donc une eau impure à la consommation. Sans eux, des oiseaux disparaissent, faute de pouvoir se nourrir.

Des pollinisateurs, acteurs essentiels des cultures

Les effets du déclin des insectes sont déjà là, rappelle Cécile Le Lann : *« Dans certaines parties du monde, les excès de l'agriculture intensive ont conduit à la disparition totale des pollinisateurs sauvages. Ainsi, en Californie, les producteurs d'amandes sont obligés de transporter des ruches d'abeilles domestiques pour polliniser des milliers d'hectares d'amandiers. Et en Chine, les agriculteurs de la région du Sichuan sont contraints de polliniser eux-mêmes les vergers au pinceau. »* Un constat qui va hélas dans le sens de la célèbre citation du grand biologiste américain Edward Osborne Wilson : *« Si les êtres humains disparaissaient, le monde se régénérerait et retrouverait son équilibre d'il y a 10 000 ans. Si les insectes disparaissaient, le monde sombrerait dans le chaos ».* ■

WILD HORIZONS/GETTY IMAGES

Parmi les espèces parthénogénétiques on trouve bon nombre de reptiles (ici, deux femelles « Aspidoscelis flagellicauda »).

Parthénogenèse : quand les femelles se suffisent à elles-mêmes

Et si une femelle pouvait vraiment « faire un bébé toute seule » ? Dans un laboratoire en Chine, une souris a donné naissance à des petits sans avoir rencontré de mâle. Très fréquent chez les insectes et les plantes, c'est en revanche la première fois que le phénomène est observé chez un mammifère.

« *Un scandale évolutif!* » Ainsi réagit en souriant Alexandra Magro, chercheuse au laboratoire Évolution et diversité biologique du CNRS, lorsqu'elle évoque la parthénogenèse. Car ce mode de reproduction asexuée, que l'on a longtemps cru réservée aux plantes et à certains insectes, n'est en fait pas si rare chez les vertébrés. Les découvertes se sont multipliées ces dernières années. Plus de 80 cas de parthénogenèse ont été recensés chez des espèces différentes de vertébrés. La majorité sont des poissons et des lézards. Mais ce phénomène a également été observé chez des vertébrés plus complexes, tels les dragons de Komodo. En 2006, au zoo de Chester en Angleterre, une femelle nommée Flora donnait des œufs viables sans avoir été en contact avec un mâle. Aujourd'hui, les chercheurs pensent que le fait est loin d'être rare chez cette espèce.

En 2017, c'est une femelle requin-zèbre prénommée Léonie qui défrayait la chronique en Australie. Seule dans son aquarium, elle avait alors mis au monde trois petits. Si les observations précédentes concernaient des individus qui ne s'étaient jamais reproduits sexuellement, Léonie, elle, avait déjà donné naissance à une vingtaine de requineaux après s'être accouplée avec un mâle ! Quelques années plus tard, un nouveau cas de parthénogenèse était observé dans un aquarium de Sardaigne, ▸

chez une femelle requin, émissole cette fois. En milieu naturel, des analyses génétiques peuvent révéler des individus issus de parthénogenèse au sein d'espèces sexuées. C'est le cas chez la raie léopard ou encore les condors de Californie, comme l'ont découvert des chercheurs du zoo de San Diego (États-Unis) en octobre 2021.

Une première expérimentale chez la souris

Devant tant d'exemples, la question se pose : est-ce que la parthénogenèse, pourrait exister aussi chez les mammifères ? Aucun exemple n'a été observé dans la nature jusqu'à présent. Mais des chercheurs de l'université de Shanghai (Chine) ont montré en 2022 que cela est possible, du moins chez les souris. En modifiant génétiquement les ovocytes d'une femelle, ils ont réussi à ce que des embryons se développent sans fécondation. Un souriceau femelle est né de cette expérience et s'est même reproduit (sexuellement) par la suite. *« Il y a tellement d'avantages à l'asexualité qu'une des grandes questions qui nous anime en tant que chercheurs est : pourquoi la majorité des animaux continuent d'avoir des rapports sexuels pour se reproduire ? »*, s'étonne Tanja Schwander, chercheuse au département Écologie et évolution de l'université de Lausanne (Suisse). L'asexualité simplifie la reproduction. Obsolète, la parade nuptiale. Pas besoin, non plus, de trouver de partenaire sur des territoires parfois immenses. Les maladies sexuellement transmissibles disparaissent… Et ce n'est pas tout : le taux de croissance des populations est beaucoup plus élevé. Par ailleurs, si une femelle se reproduit, c'est qu'elle détient une bonne combinaison de gènes. La meilleure stratégie, d'un point de vue évolutif, serait donc de garder cette combinaison et de la transmettre de génération en génération. C'est justement ce qui se produit lors de la reproduction par parthénogenèse. *« Si on jouait au poker sans pouvoir bluffer, alors le gagnant serait celui qui a la meilleure combinaison de cartes,* illustre Tanja Schwander. *Dès lors, si au tour suivant, on peut choisir entre le set de cartes qui vient de gagner ou un set de cartes aléatoire dans la pile, les chances de l'emporter seront toujours plus élevées en gardant le set précédent. L'asexualité conserve les mêmes combinaisons de gènes, qui ont été favorisées par la sélection, alors que la reproduction sexuée mélange tout et recommence à zéro. »* Ni plus ni moins un scandale évolutif en effet !

UNIL

« Il y a tant d'avantages à l'asexualité : pourquoi la majorité des animaux continuent d'avoir des rapports ? »

Tanja Schwander, chercheuse au département Écologie et évolution de l'université de Lausanne (Suisse)

De quoi expliquer que la parthénogenèse est très fréquente chez les insectes. *« Des espèces entières se reproduisent uniquement de cette manière »*, rappelle Alexandra Magro. On les appelle espèces « parthénogénétiques ». Leur particularité : elles ne comptent plus aucun mâle. Parmi elles, des insectes, comme des guêpes et des coléoptères, mais aussi des lézards… À titre d'exemple, *Aspidoscelis uniparens* est une espèce de lézards qui ne compte plus que des femelles parthénogénétiques. Elles se mordent entre elles pour déclencher la parthénogenèse. Un rituel partagé avec d'autres espèces de la même famille, qui se reproduisent sexuellement. Le mâle mord la femelle, ce qui a pour effet de stimuler l'ovulation.

YANCHANG WEI ET AL.

Souriceaux nés sans fécondation d'une mère génétiquement modifiée.

Une solution pour recoloniser rapidement des milieux

« Souvent, une espèce parthénogénétique est une espèce dite hybride », précise Alexandra Magro. Les ancêtres de cette population sont deux espèces sexuées et il y a eu accouplement entre un mâle et une femelle de chacun de ces deux groupes. De ce croisement peut naître une femelle hybride parthénogénétique. Celle-ci donne alors naissance uniquement à des femelles, à qui elle transmet la capacité de se reproduire toutes seules. *« De temps en temps, un mâle spontané peut apparaître, mais il n'a pas d'incidence pour l'évolution de l'espèce : les individus ne se mettent pas à pratiquer la reproduction sexuée pour autant. Le mâle finit simplement par mourir »*, explique Tanja Schwander. Revers de la médaille : la variabilité génétique des espèces asexuées est bien moins grande que chez les espèces qui se reproduisent sexuellement. Elles sont donc également plus sensibles que les espèces sexuées aux changements écologiques, aux parasites, aux maladies, etc. Pour autant, *« ce ne sont pas des clones,* insiste la chercheuse. *Des mutations spontanées se produisent et les individus à l'origine de la population parthénogénétique arrivent avec un matériel génétique différent. Cela apporte de la diversité au sein de la population par la suite, même si ce n'est pas comparable à la diversité au sein des espèces sexuées. »* Dans les écosystèmes fragiles où les

RICK BOWERS / BIA / BIOSPHOTO

Les condors de Californie recourent ponctuellement à la parthénogenèse.

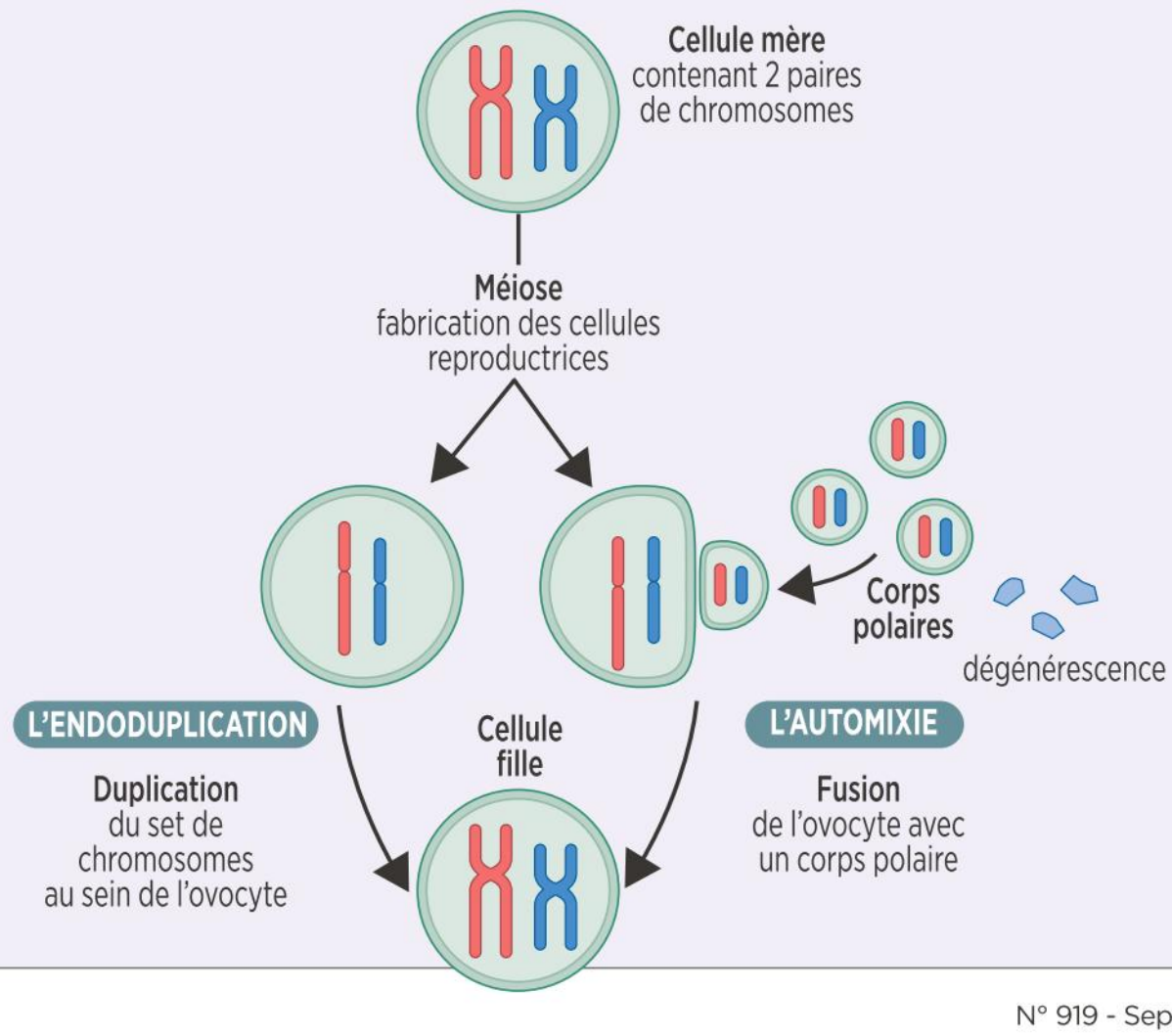
MÉCANISMES

Deux formes de reproduction asexuée

Dans la reproduction sexuée, un ovule et un spermatozoïde apportent, chacun, du matériel génétique. À l'intérieur de la cellule œuf, les chromosomes vont par paire ; chaque parent apporte un chromosome de la paire. On dit que la cellule est diploïde. Mais d'où viennent les chromosomes supplémentaires lorsque la femelle se reproduit par parthénogenèse ? *« Il existe différents mécanismes qui aboutissent à une naissance vierge »*, souligne Tanja Schwander, chercheuse au département Écologie et évolution de l'université de Lausanne (Suisse). Pour la majorité des vertébrés asexués, comme certains lézards et geckos, s'opère une duplication supplémentaire de leur set de chromosomes. On appelle ce phénomène l'endoduplication. Autre possibilité, l'automixie : deux cellules reproductrices fusionnent. C'est le cas chez certains requins.

Lors de la fabrication des cellules reproductrices — la méiose — se forment une grande cellule reproductrice et trois petites cellules nommées « corps polaires ». Chacune est haploïde, c'est-à-dire qu'elle dispose d'un seul jeu de chromosomes. En temps normal, les corps polaires dégénèrent et c'est la cellule reproductrice qui est fertilisée. Chez certaines espèces, un des corps polaires fusionne avec la cellule reproductrice.
Il existe enfin un cas encore plus étonnant : la parthénogenèse peut être induite par une bactérie, comme chez certaines guêpes. Lorsque les femelles sont infectées par la bactérie *Wolbachia*, elles se reproduisent seules et transmettent la bactérie à leurs progénitures par les œufs. L'infection peut entraîner une endoduplication ou une automixie. Dans les deux cas, la diploïdie est restaurée.

BRUNO BOURGEOIS



feux de forêts peuvent faire disparaître des populations entières, la parthénogenèse apparaît comme une solution pour recoloniser rapidement le milieu à partir d'une poignée d'individus ou encore pour repeupler des espèces en voie d'extinction. C'est le cas des condors de Californie, dont des chercheurs ont découvert qu'ils étaient issus de parthénogenèses. Alors même que les femelles avaient accès à des mâles, les échantillons ADN des deux oiseaux ne présentaient aucune trace d'un père. C'est ce qu'on appelle la parthénogenèse facultative : les femelles ont recours à la parthénogenèse ponctuellement, et se reproduisent sexuellement le reste du temps.

Chez l'humain, les barrières génétiques sont nombreuses

Puisqu'elle est si fréquente et théoriquement possible chez la souris, impossible de se demander si, en cas de crise, elle pourrait se produire chez l'humain ? *« En théorie on pourrait imaginer une parthénogenèse chez l'humain,* admet Tanja Schwander, qui tempère immédiatement : *on pense néanmoins qu'une partie du développement embryonnaire des mammifères n'est possible qu'après une fécondation. Aussi, de nombreuses mutations seraient nécessaires.* » En effet, le matériel génétique des deux parents est nécessaire pour que l'embryon se développe. Et la naissance d'un garçon par parthénogenèse serait exclue, à moins d'une mutation ou d'une translation de certains gènes du chromosome Y vers le chromosome X. Par ailleurs, chez l'être humain, l'entrée du spermatozoïde dans l'ovule détermine la place de la tête. Autant de preuves que la reproduction sexuée est le résultat de nombreuses adaptations qui sont devenues autant de barrières à l'asexualité. ■

Marie Parra

Un été 2021 bien plus chaud que durant l'optimum médiéval

La reconstitution des températures sur le dernier millénaire grâce aux cernes des arbres montre que la canicule de 2021 en Amérique du Nord a largement excédé les chaleurs de l'optimum climatique médiéval (950-1350). Le caractère anthropique du changement climatique actuel est une nouvelle fois confirmé.

À partir du 27 juin 2021, l'ouest du Canada et le nord-ouest des États-Unis ont connu des chaleurs extrêmes jamais constatées dans cette région pourtant septentrionale. Un record de 49,6 °C a été enregistré le 29 juin au pied de la chaîne des Rocheuses. C'était près de 5 °C de plus que le précédent record canadien de 45 °C enregistré en 1937. Météo France avait même signalé que c'était également un record absolu pour une station située au-dessus de 50 degrés de latitude nord.

Le phénomène a été bien détaillé par les services météorologiques canadiens et américains. La chaleur remontant du Mexique a été bloquée par un anticyclone puissant, formant une bulle d'air chaud placée très haut en altitude. Un « dôme de chaleur » s'est formé qui a détourné pendant plusieurs jours vers le pôle Nord les dépressions provenant de l'océan Pacifique. Mais au-delà de l'explication technique, dans quelle mesure cette vague de chaleur peut être mise en relation avec l'accumulation des gaz à effet de serre émis par l'humain dans l'atmosphère ? Était-ce un événement exceptionnel ou bien l'avertissement de périodes estivales de plus en plus chaudes ? Les climatologues du World Weather Attribution ont conclu qu'un tel épisode n'aurait pas eu une telle intensité si les températures mondiales n'avaient pas augmenté de 1,1 °C depuis 1850.

Le laboratoire de dendrologie de l'université Columbia (New York, États-Unis) a en outre révélé cet été dans la revue *Nature* que les températures enregistrées lors de cette vague de chaleur étaient supérieures d'au moins 1,5 °C par rapport à celles de « l'optimum climatique médiéval », une période chaude survenue entre environ 950 et 1350 qui a favorisé le développement humain. À partir de la chronique des dates des moissons et des vendanges, l'historien Emmanuel Leroy-Ladurie a documenté des changements tels que des défrichements de forêts plus importants, des rendements de récoltes plus élevés et un fort essor démographique. Les historiens et climatologues restent prudents sur le caractère mondial de

PHÉNOMÈNE CLIMATIQUE

Le retour d'El Niño confirmé

Alors que l'hémisphère Nord enregistrait cet été de nouveaux records de chaleur, l'hiver dans l'hémisphère Sud était également anormalement chaud. Le 1er août, le thermomètre affichait 30 °C à Buenos Aires (Argentine), battant le record de 1942 qui était de… 24,6 °C. *« Il y a dix ans, nous avions deux vagues de chaleur par an, et là nous parlons déjà de neuf »*, expliquait à l'AFP Raul Cordero, de l'université de Santiago du Chili. En cause : le phénomène El Niño qui s'additionne au réchauffement climatique. L'Organisation météorologique mondiale a confirmé en juillet le retour de ce phénomène climatique caractérisé par une augmentation de la température des eaux de surface du Pacifique près des côtes de l'Amérique du Sud. Elle estime à 90 % la probabilité qu'El Niño se poursuive jusqu'à la fin 2023, avec des déficits de pluie en Asie du Sud-Est et des risques de précipitations extrêmes en Amérique du Sud. M. N.

ETHAN SWOPE/AP/SIPA

La canicule de juin 2021 en Amérique du Nord a atteint des records absolus de température (ici le lac d'Oroville, en Californie).

ce phénomène dont les causes ne sont pas bien fixées : variation de l'activité solaire ? Faiblesse des émissions de particules soufrées par le volcanisme ? Affaiblissement des courants océaniques ? Ce qui est certain, c'est que cette amélioration climatique a permis aux Vikings de conquérir le Groenland.

Des équations établies à partir des cernes annuels des arbres

Le travail du laboratoire américain montre que cet optimum climatique a aussi concerné le nord-ouest des États-Unis. Les chercheurs ont procédé à des carottages dans les troncs de 29 conifères de cette région dont deux étaient déjà présents à l'époque médiévale. Les cernes des arbres sont des témoins fiables des températures de surface. Dans les années chaudes, les végétaux doivent faire des arbitrages entre préserver leur eau pour éviter le dessèchement ou croître. Les fonctions de photosynthèse et d'évapotranspiration passent en effet par les stomates, des opercules à la surface des feuilles. Quand ces stomates sont fermés, l'eau est préservée mais la photosynthèse et donc la croissance s'arrêtent. Les cernes annuels traduisent ces variations climatiques que la dendrologie a mis en équation.

Avec ces mesures et à l'appui de modèles climatiques, les chercheurs ont ainsi établi que la température constatée en 2021 avait 0,004 % de probabilité de pouvoir se produire en l'an 950. Pour étayer leur argumentaire, les dendrologues se sont intéressés à des périodes plus longues de quelques décennies. Ils ont ainsi pu établir qu'entre 1979 et 2021, les températures ont été supérieures de 1,27 °C par rapport aux décennies 1951-1980. Après juin 2021, il faut remonter à 1045 pour trouver la deuxième période la plus chaude (1045-1087), avec une anomalie moyenne de températures plus élevées de 0,68 °C, soit près de deux fois moins qu'au XXIe siècle. « *Même pendant la période la plus chaude de l'optimum médiéval, la moyenne des températures estivales est approximativement de 0,59 °C plus fraîche que celles enregistrées depuis 1979* », précisent les auteurs. Ce travail confirme par ailleurs que la probabilité de la survenue de dômes de chaleur aussi puissants va augmenter de 70 % dans les années 2070 dans le cas d'un scénario d'augmentation des températures de 4,5 °C, qui est la tendance de la période présente où les engagements de réduction de gaz à effet de serre n'ont pas encore été mis en œuvre. Le réchauffement de l'an mil qui n'avait pas de causes humaines était donc bien moindre que celui auquel l'humanité est aujourd'hui confrontée. ■

La probabilité de la survenue de dômes de chaleur aussi puissants va augmenter de 70 % dans les années 2070 en cas de scénario climatique à + 4,5 °C

Loïc Chauveau @Loic_Chauveau

ALZHEIMER - PARKINSON

Le retour des thérapies innovantes

De nouveaux traitements laissent espérer une réduction du déclin cognitif à un stade précoce de la maladie d'Alzheimer. De même, des thérapies plus ciblées améliorent les symptômes des malades de Parkinson. Mais ces nouvelles approches ne suffisent pas, prévient le neurologue Yves Agid qui appelle à élargir le champ des recherches pour comprendre les mécanismes précis de ces affections.

Dossier réalisé par
Cécile Coumau, Hugo Jalinière,
Coralie Lemke, Sylvie Riou-Milliot

ALZHEIMER
Les médicaments de l'espoir
p. 52

INTERVIEW
Yves Agid, professeur émérite de neurologie à Sorbonne Université p. 56

PARKINSON
Les 5 nouveaux traitements
p. 60

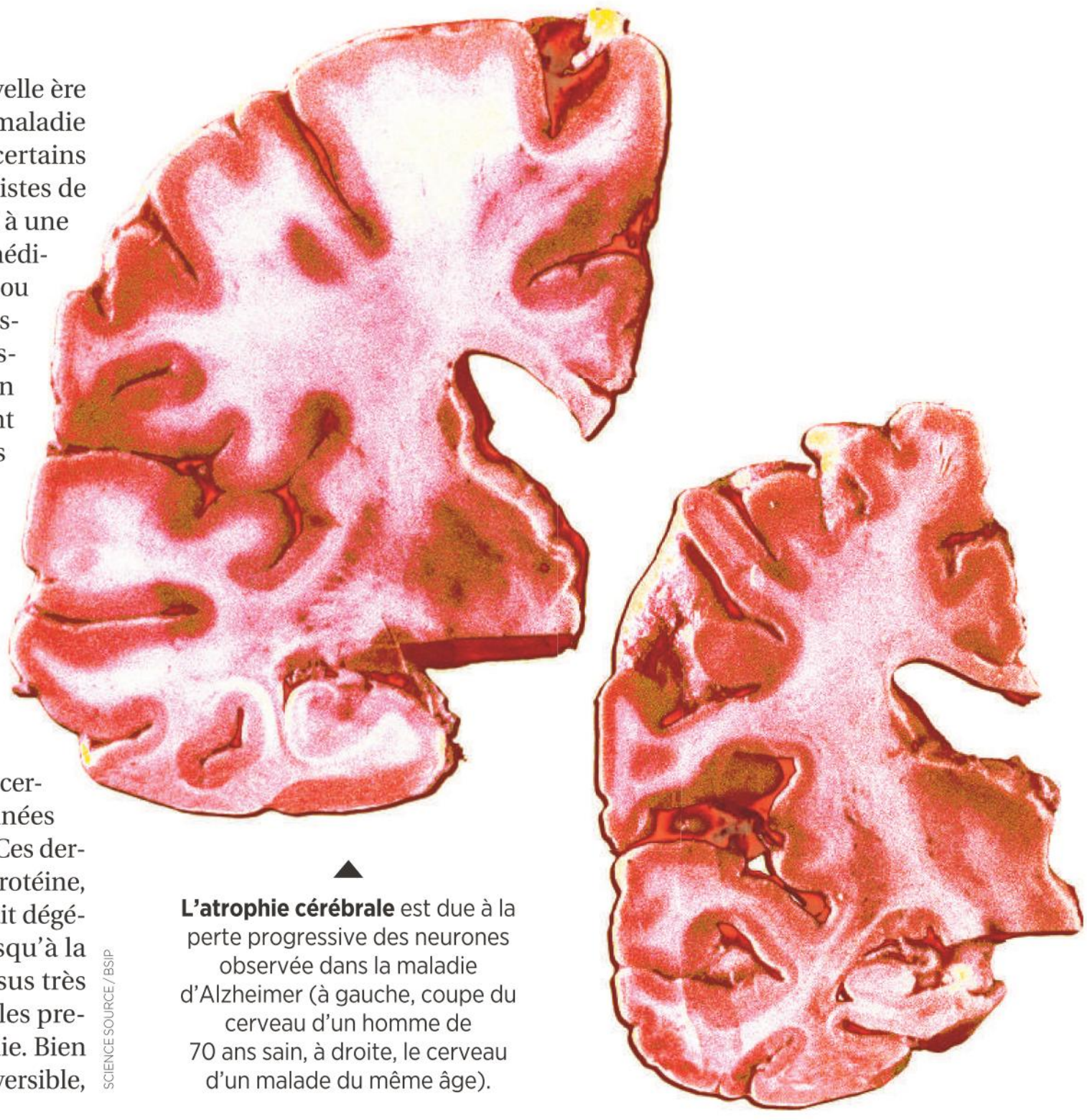
AMELIE-BENOIST / IMAGE POINT FR / BSIP

Alzheimer, les médicaments de l'espoir

Trois nouveaux traitements aux États-Unis permettent de réduire le déclin cognitif des patients. Mais leur prise est souvent associée à des effets secondaires importants. Les autorités sanitaires européennes hésitent à autoriser leur commercialisation.

Est-ce le début d'une nouvelle ère dans le traitement de la maladie d'Alzheimer ? Alors que certains médecins pensaient que les pistes de recherche actuelles menaient à une impasse, coup sur coup, trois médicaments ont été commercialisés ou sont en passe de l'être aux États-Unis. Des traitements avec lesquels, pour la première fois, on peut associer un ralentissement du déclin cognitif aux effets visibles dans le cerveau.

Ces effets sont une réduction dans l'accumulation d'agrégats protéiques que les chercheurs pensent nocifs. Cette piste de recherche, dite de la cascade amyloïde, remonte aux débuts des années 1990. La protéine bêta-amyloïde, naturellement présente dans le cerveau, s'accumule au fil des années et finit par former des dépôts. Ces derniers déstabilisent une autre protéine, tau, dont la désorganisation fait dégénérer les neurones, allant jusqu'à la mort des cellules. Un processus très lent, qui s'installe bien avant les premiers symptômes de la maladie. Bien que le processus ne soit pas réversible,



SCIENCE SOURCE / BSIP

L'atrophie cérébrale est due à la perte progressive des neurones observée dans la maladie d'Alzheimer (à gauche, coupe du cerveau d'un homme de 70 ans sain, à droite, le cerveau d'un malade du même âge).

il est ralenti par cette nouvelle génération de molécules : l'aducanumab (Aduhelm) du laboratoire Biogen autorisé en 2021 ; le lecanemab au début de cette année ; et, enfin, le donanemab d'Eli Lilly qui a déposé sa demande d'autorisation en juillet. Trois anticorps monoclonaux administrés par intraveineuse chez le patient toutes les deux semaines. Tous ont la même action : ils sont formulés pour détecter et détruire les protéines bêta-amyloïde et tau. L'aducanumab a été le premier à montrer une réduction des dépôts amyloïdes, sans lien toutefois avec une amélioration sur le plan clinique pour le patient. Un tour de force que le lecanemab a, lui, réussi : les études cliniques annoncent que ce dernier a permis de réduire de 27 % le déclin cognitif des patients traités sur une période de dix-huit mois, par rapport au groupe de patients ayant reçu un placebo. Enfin, Eli Lilly annonce dans un communiqué que le donanemab permettrait de ralentir le déclin clinique de 35 % par rapport au placebo et de 40 % pour la capacité à effectuer les activités de la vie quotidienne.

Une réaction inflammatoire sous l'effet des anticorps

Derrière les chiffres, que peut-on espérer concrètement de cette nouvelle classe de traitements ? « *Si votre père ou votre mère se trouve déjà dans un Ehpad, alors ces molécules ne sont pas pour lui ou pour elle,* préfère prévenir d'emblée Philippe Amouyel, professeur de santé publique au CHU de Lille et directeur de la Fondation Alzheimer. *En clair, le but est de retarder au maximum l'entrée dans une institution et de favoriser l'autonomie le plus longtemps possible. On peut vivre à peu près normalement, tant qu'on a des fonctions exécutives — comme savoir composer un numéro de téléphone —, que la mémoire n'est pas trop affectée et qu'il n'y a pas de troubles du comportement, par exemple quelqu'un qui devient subitement agressif.* »

Mais en parallèle de ces effets positifs, les résultats des essais avec le lecanemab ont montré que le médicament n'est pas sans risques. Environ 30 % des malades ont présenté des effets secondaires, du plus léger au plus grave. Ils ont été sévères pour 10 % d'entre eux, et 5 % ont même dû arrêter le traitement. Ces effets, tous de même nature, sont nommés des Aria, des anomalies d'imagerie liée à l'amyloïde : des œdèmes ou des hémorragies du cerveau observables à l'IRM. Il s'agit d'une réaction inflammatoire sous l'effet des anticorps, qui entraîne dans les deux cas une compression de la boîte crânienne. Trois personnes de la cohorte sont décédées à cause de ces effets indésirables. « *Après vingt-trois ans à attendre qu'un effet clinique soit associé à la suppression des lésions amyloïdes, nous sommes passés de l'enthousiasme à la gueule de bois. On voit bien que l'effet modeste n'est pas dénué d'effets secondaires et a été fatal à trois personnes qui avaient encore des années devant eux* », regrette Bruno Dubois, professeur de neurologie à l'université Pierre-et-Marie-Curie, et directeur de l'Institut de la mémoire et de la maladie d'Alzheimer (IM2A) à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris. Pour l'heure, ces nouveaux médica-

THÉRAPEUTIQUE

Un vaccin nasal en cours d'essai

Plutôt que d'attaquer directement les agrégats de protéines bêta-amyloïdes dans le cerveau avec des anticorps cultivés en laboratoire, nombre d'équipes dans le monde cherchent à recruter le système immunitaire des patients pour lui apprendre à « nettoyer » le cerveau avant que celui-ci ne soit endommagé. « *Depuis vingt ans, il est de plus en plus évident que le système immunitaire joue un rôle clé dans la régulation de la protéine bêta-amyloïde et donc dans l'apparition et l'évolution de la maladie* », pose la Pr Tanuja Chitnis, neurologue au Massachusetts General Hospital à Boston (États-Unis). Avec le Pr Howard Weiner, elle pilote en ce moment un essai clinique de phase 2 pour un vaccin nasal facile à administrer, visant à activer les globules blancs de patients diagnostiqués à un stade précoce de la maladie. L'objectif est d'alerter au plus tôt l'immunité propre au système nerveux central, la microglie, pour qu'elle empêche l'accumulation pathologique de la protéine bêta-amyloïde. En effet, une fois que les plaques amyloïdes commencent à se former, la microglie tend à s'emballer et provoque une inflammation qui alimente le cercle vicieux de la neurodégénérescence. À l'inverse, si la microglie est maintenue en alerte, elle peut empêcher l'entrée dans le processus pathologique. « *Si cela fonctionne vraiment, il serait possible d'administrer le vaccin à des personnes dans la cinquantaine ou la soixantaine qui n'ont pas encore la maladie d'Alzheimer, mais présentent un profil à risque. Ce serait comme traiter l'hypertension artérielle pour prévenir les accidents vasculaires cérébraux et les crises cardiaques* », résume Howard Weiner. De fait, le développement de tests sanguins plus précis permettrait à terme d'identifier de façon très précoce un Alzheimer présymptomatique. **H. J.**

ALZHEIMER'S ASSOCIATION

VERBATIM

DR MARIA CARRILLO

DIRECTRICE SCIENTIFIQUE D'ALZHEIMER'S ASSOCIATION*

« Une période passionnante pour la recherche »

« À mesure que de nouveaux médicaments seront approuvés, la détection et le diagnostic précoces deviendront encore plus essentiels pour s'assurer que les malades en bénéficient au maximum et le plus tôt possible. On le voit avec le donanemab en passe d'être autorisé aux États-Unis : les effets mesurés dans l'essai clinique étaient d'autant plus importants que les patients étaient traités à un stade précoce de leur maladie. D'ailleurs, la catégorie de traitements qui devraient être approuvés par la FDA (l'Agence américaine du médicament) au cours des prochaines années est essentiellement testée chez les personnes atteintes de démence précoce. Ces dernières années, la recherche de biomarqueurs sanguins a ainsi montré des performances exceptionnelles dans notre capacité à détecter un Alzheimer avant même que des lésions cérébrales n'apparaissent. Des travaux qui nourrissent la promesse d'un changement radical dans le processus de diagnostic une fois que de tels tests sanguins seront validés. À plus forte raison, que ces analyses sanguines seraient beaucoup moins coûteuses et bien plus simples d'utilisation. Avec des investissements records dans la recherche publique et privée, les chercheurs font avancer notre compréhension de la maladie, non seulement en explorant ces nouveaux biomarqueurs, mais en découvrant aussi des moyens de prévention (alimentation, activité physique, stimulation intellectuelle…) ou en travaillant à faire progresser les stratégies les plus prometteuses vers les essais cliniques. Nous vivons clairement une période passionnante pour la recherche. Parce qu'elle nous dévoile la grande complexité de la maladie d'Alzheimer. Il y a désormais de nombreux traitements en développement, comprenant une grande variété de cibles et de mécanismes d'action. Cela offre un espoir significatif. Nous pouvons désormais envisager un avenir où il existe plusieurs traitements disponibles qui abordent la maladie de différentes manières, comme c'est le cas pour les pathologies cardiaques ou le cancer, et pouvant être combinées pour de puissantes thérapies. Nous savons aujourd'hui qu'il est possible de ralentir la neurodégénérescence et, espérons-le, de la stopper dans un avenir proche. Non pas pour arrêter le processus de vieillissement normal du cerveau, mais pour permettre qu'il se déroule de manière à nous faire profiter pleinement de nos dernières années. » ■

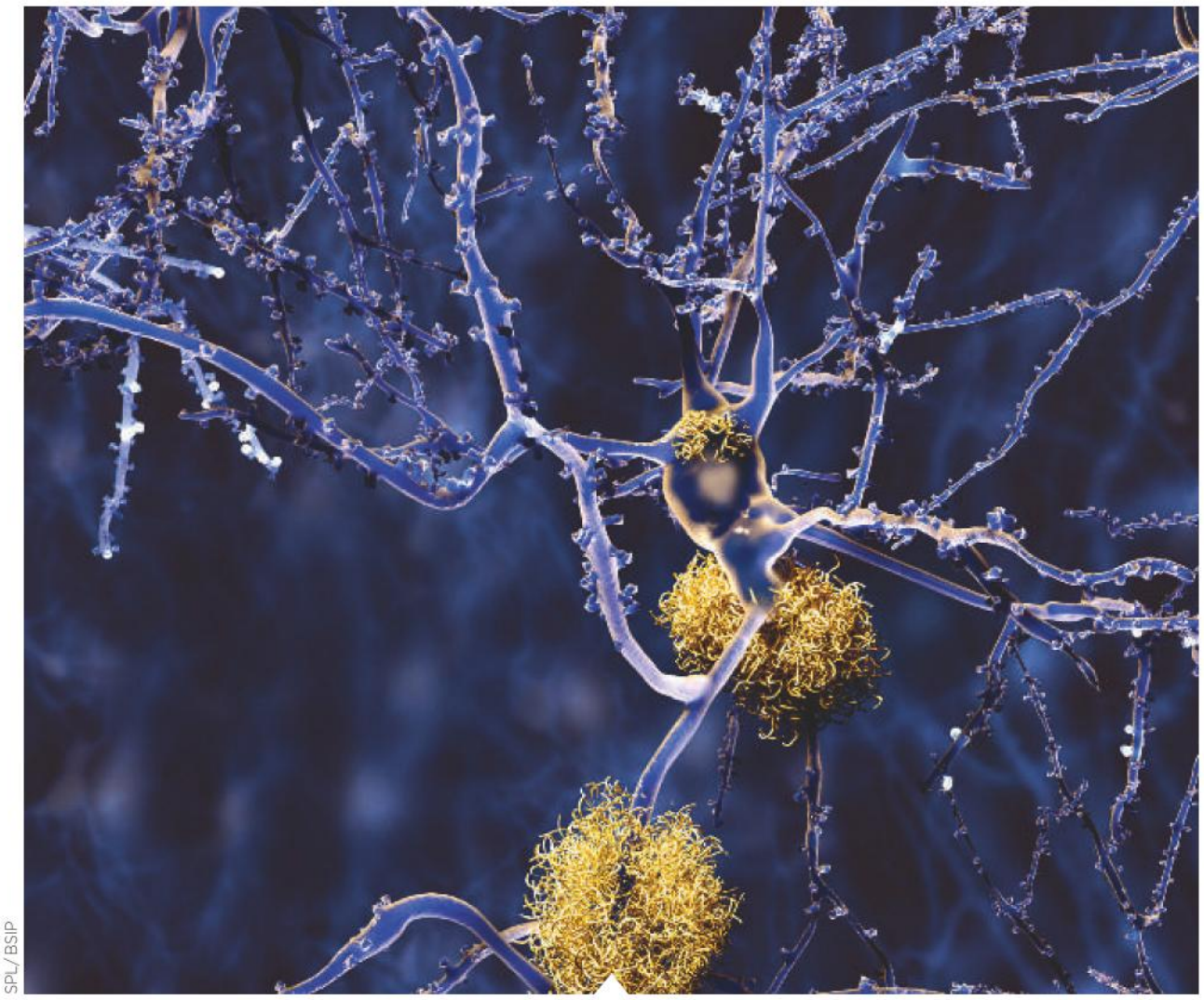
Propos recueillis par H. J.

* Première organisation de santé bénévole au monde consacrée aux soins, au soutien et à la recherche sur la maladie d'Alzheimer.

ments ne sont disponibles qu'aux États-Unis, mais un dossier concernant le lecanemab a été remis à l'Agence européenne du médicament (EMA) pour évaluation. Parmi les facteurs que cette dernière devra étudier, il y a l'effet biologique démontré mais également le coût du traitement, fixé à 26 500 dollars (environ 24 300 euros) par an et par patient. *« Ce n'est pas certain que la réponse de l'EMA soit positive. Si l'Europe dit oui, le lecanemab pourra bénéficier d'une procédure spéciale, qu'on appelle le "fast track". Mais même avec ces formalités plus rapides, ce ne sera pas avant 2025 »*, prévient Bruno Dubois. L'adulhem, du laboratoire Biogen, a déjà été rejeté par l'Union européenne, le Japon et la Grande-Bretagne. *« Pour le lecanemab, l'agence va devoir mettre de côté le bénéfice individuel et trancher sur le bénéfice de santé publique : collectivement, ce léger ralentissement de la maladie accompagné d'un risque d'effets secondaire vaut-il la peine ? »*, pose Philippe Amouyel.

Administrer la thérapie avant les premiers symptômes

Et subsiste une grande inconnue : que se passe-t-il au-delà des dix-huit mois durant lesquels le traitement a été testé ? En l'absence d'études complémentaires, impossible de savoir si l'effet se stabilise ou se maintient. L'hypothèse la plus positive est que la poursuite du traitement, s'il est bien toléré, pourrait en prolonger les effets. Les progrès pourraient alors aller croissant et faire gagner petit à petit des mois supplémentaires d'autonomie. Surtout que les perspectives ne sont pas les mêmes selon le degré d'avancement de la maladie. Dans les études présentées par les laboratoires Esai et Biogen, les patients inclus sont soit à des stades très précoces, soit à des stades « prodromaux », c'est-à-dire avec des symptômes avant-coureurs bénins. *« À ces niveaux, la personne va normalement tomber dans une dépendance qui nécessite un placement au bout de cinq ou six ans,* explique Philippe



SPL/BSIP

La réduction des plaques amyloïdes (en jaune) dans le cerveau avec l'administration de la nouvelle classe de médicaments a permis un ralentissement du déclin cognitif.

Amouyel. *Si vraiment la baisse d'environ 30 % du ralentissement de la maladie se prolongeait sur les cinq ans qui suivent, ces patients pourraient espérer gagner environ un an d'autonomie supplémentaire. D'un point de vue individuel, la réponse affective des familles est positive.* »

Cette estimation peut paraître modeste, d'autant qu'à l'imagerie, le lecanemab montre une très nette réduction de la plaque bêta-amyloïde. Pour que l'effet sur la vie de tous les jours soit plus net, il faudrait commencer à administrer la thérapie plus tôt encore, avant même que les symptômes n'apparaissent. On sait désormais que les plaques commencent à s'accumuler dans le cerveau vingt à trente ans avant les signes de démence, donc dès 45 ans. « *Mais tous les patients qui ont de la plaque ne développent pas forcément un Alzheimer, le lien n'est pas formel* », avertit Bruno Dubois. Pour identifier les patients qui développeront vraiment la maladie d'Alzheimer, le directeur de l'IM2A mise sur l'intelligence artificielle. « *À terme, un algorithme à plusieurs inconnues pourrait être la solution. Parmi les facteurs à prendre en compte, l'âge bien sûr, la présence de plaque amyloïde, mais aussi celle du gène APOE, dont on sait qu'il est lié avec l'apparition de la maladie, ou encore d'autres facteurs de la vie.* » Un algorithme, qui, il l'espère, verra le jour au Cermad, le Centre d'excellence pour la recherche sur la maladie d'Alzheimer, qui doit prochainement voir le jour à la Pitié-Salpêtrière.

Des molécules qui s'attaquent à la source de la pathologie

Aussi modestes soient-ils, les effets de ces nouvelles molécules permettent néanmoins pour la première fois de s'attaquer à la source de la maladie. « *Dans la seconde moitié des années 1990, des médicaments agissant sur les symptômes avaient été mis sur le marché. C'était l'acétylcholine, un neurotransmetteur du système nerveux central, dont manquent les personnes atteintes d'Alzheimer,* explique Philippe Amouyel. *Environ 20 % des patients répondaient à ce traitement. Cela pouvait être spectaculaire, tels des patients qui reconnaissaient à nouveau leurs petits-enfants.* » Mais il était impossible de savoir en amont si la densité de neurones du patient permettait d'obtenir cet effet positif. C'est pourquoi la France avait alors décidé de dérembourser ces médicaments. S'en est suivie une longue traversée du désert dans le domaine.

Après avoir délaissé cette pathologie, les industriels sont désormais de retour dans la course. « *L'industrie pharmaceutique a été capable de fabriquer un médicament sur la base d'une découverte fondamentale. C'est le côté positif : le marché est gigantesque, donc les laboratoires sont nombreux à réinvestir cette maladie* », se félicite Philippe Amouyel. Reste à savoir si les premiers effets annoncés transforment vraiment l'essai sur le long terme. Et si, à l'instar de la Food and Drug Administration aux États-Unis, l'Agence européenne du médicament donnera son feu vert. ■

C. L.

@CoralieLemke

MAXPPP

« Le marché est gigantesque, donc les laboratoires sont nombreux à réinvestir cette maladie »

Philippe Amouyel, professeur de santé publique au CHU de Lille et directeur de la Fondation Alzheimer

YVES AGID
PROFESSEUR ÉMÉRITE DE NEUROLOGIE ET DE BIOLOGIE CELLULAIRE À SORBONNE UNIVERSITÉ,
DIRECTEUR SCIENTIFIQUE DE L'INSTITUT DU CERVEAU, À PARIS

« Changeons notre fusil d'épaule pour faire avancer la recherche »

Pour trouver de nouveaux médicaments contre les neurodégénérescences, il faut d'abord comprendre les ressorts biologiques qui en sont à l'origine, plaide le neurologue Yves Agid.

Des troubles de la mémoire chez un senior doivent-ils forcément conduire à consulter ?
Tout le monde se plaint de sa mémoire. Il s'agit le plus souvent d'oublis bénins. C'est ce qu'on observe chez des sujets anxieux ou surmenés. Dans ce cas, les connaissances ont été stockées dans le cerveau, mais il est difficile de se les rappeler. L'oubli bénin résulte d'un défaut d'attention. Tel n'est pas le cas dans la maladie d'Alzheimer, où les lésions du cerveau (notamment dans une petite structure appelée hippocampe) sont telles que les connaissances ne sont pas stockées. En cas de doute, il est raisonnable de faire des tests neuropsychologiques précis pour trancher. Par exemple, on peut faire une épreuve du type de celle des « 5 mots » : on demande au patient de retenir une liste de cinq mots (par exemple : flacon, autobus, etc.). Au bout de quelques minutes, on lui demande de les retrouver. Habituellement, seulement une partie des mots est rappelée. Dès lors, la série des cinq mots est énumérée par l'investigateur au milieu d'autres mots. Ces indices permettent de retrouver les mots chez un sujet « normal » car ces derniers ont été stockés dans la mémoire. Mais, tel n'est pas le cas dans la maladie d'Alzheimer : le sujet est incapable de retrouver les mots car ceux-ci n'ont pas été stockés.

L'arrivée récente de nouveaux traitements contre la maladie d'Alzheimer vous fait-elle dire que nous entrons dans une nouvelle ère, après des décennies de recherches infructueuses ?
Je ne suis pas sûr qu'on soit à un tournant. Certes, quelques espoirs sont apparus ici et là, en particulier le succès récent d'un anticorps monoclonal autorisé par la FDA [l'agence américaine du médicament], lequel entraîne la diminution d'une anomalie qu'on voit au microscope dans le cerveau des malades, les plaques séniles qui contiennent la protéine bêta-amyloïde pathologique. Plusieurs études ont démontré que ce type d'anticorps monoclonal arrive effectivement à débarrasser, au moins partiellement, le cerveau des malades de ces corpuscules anormaux. Le problème, c'est que les signes cliniques ne s'améliorent pas, ou peu ; un léger bénéfice est effectivement perceptible avec ce dernier médicament. 150 essais thérapeutiques sont en cours dans le monde. Attendons les résultats. Il faut absolument continuer à chercher dans ce domaine, mais ne faudrait-il pas aussi songer à changer notre fusil d'épaule ? Il y a eu tellement d'échecs. Est-ce que continuer à développer de nouveaux anticorps contre la seule protéine bêta-amyloïde est justifié ?

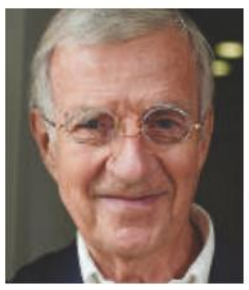
Pour déboucher sur de vraies solutions thérapeutiques dans les maladies neurodégénératives, estimez-vous que la recherche n'est pas sur la bonne voie ?
Compte tenu de ces échecs, nous devons penser autrement, c'est-à-dire envisager la recherche sous d'autres angles. Pour trouver de nouveaux médicaments, il faut d'abord en comprendre les mécanismes intimes et les causes.
Certes, de nombreux traitements curatifs ou symptomatiques ont déjà été découverts sans qu'on connaisse les données biologiques sous-jacentes. Mais en l'occurrence, je crois que si nous ne cherchons pas à décrypter les ressorts biologiques à l'origine des neurodégénérescences, nous perdons notre temps. ▶

BIO EXPRESS

- **13 novembre 1940 :** Naissance à Nice.
- **1979 :** Professeur de neurologie et de biologie cellulaire.
- **1985 :** Directeur de l'unité Inserm Mécanismes et conséquences de la mort neuronale.
- **1993 :** Chef de service du département de neurologie de l'hôpital de La Pitié-Salpêtrière, à Paris.
- **2008 :** Membre de l'Académie des sciences
- **2010 :** Membre fondateur de l'Institut du cerveau, à Paris.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR – LA RECHERCHE

Est-ce que, selon vous, il faut élargir notre champ de vision pour mener des recherches sur ces maladies dans leur ensemble ?
Oui, il faut comprendre la différence entre le phénomène de vieillissement du cerveau et une maladie neurodégénérative sur le plan clinique, histologique [analyse des tissus], moléculaire et épidémiologique. Or, ce n'est pas avec l'imagerie cérébrale ou les techniques d'électroencéphalogramme qu'on saisira ce qui se passe dans le cerveau des malades. Pour comprendre l'origine de ces pathologies, il faut savoir ce qui se passe à l'échelle cellulaire et moléculaire. Pour cela, il convient de revenir à la définition des maladies neurodégénératives. Classiquement, elles se caractérisent d'un point de vue anatomique et clinique. Les lésions du tissu nerveux sont de deux ordres : une perte neuronale qui est à la fois lente (mais plus rapide que dans le vieillissement normal) et sélective — autrement dit seul un nombre restreint de circuits de neurones est concerné. À ces lésions, sont associés des signes cliniques, dont l'aggravation est progressive, qui peuvent être des troubles moteurs dans la maladie de Parkinson ou des troubles de la mémoire dans celle d'Alzheimer. Mais ces données ne livrent aucune information sur les mécanismes à l'origine de ces maladies.



> « Les neurones ne sont pas les seuls responsables du dysfonctionnement cérébral »

Quelles sont les hypothèses dont nous disposons ?
Tout le monde est d'accord pour dire que les symptômes résultent du dysfonctionnement caractéristique de neurones particuliers dans certaines régions du cerveau. Les mécanismes de la mort de ces neurones sont encore mal connus. La plupart des scientifiques considèrent que les stigmates histopathologiques [lésions des tissus] sont à l'origine de la mort neuronale, en l'occurrence l'accumulation de la protéine amyloïde dans le cas de la maladie d'Alzheimer. Mais, compte tenu de l'échec relatif des essais thérapeutiques, je me demande si nous ne devrions pas inverser la réflexion. Autrement dit, est-ce que l'apparition de ces lésions ne serait pas la cause mais la conséquence de la perte neuronale ? Comme la perte neuronale est lente, on peut se demander si le processus pathologique ne dépend pas tout simplement de la vitesse de la mort neuronale. Les deux hypothèses ne sont pas contradictoires, cette dernière entraînant les anomalies histologiques, lesquelles, à leur tour, contribuent à la souffrance des neurones. Comme un cercle vicieux. D'autre part, les neurones ne sont pas les seuls responsables du dysfonctionnement cérébral. N'oublions pas qu'ils ne représentent que la moitié des cellules cérébrales. Pour comprendre le processus de neurodégénérescence, il faut peut-être prendre en compte l'ensemble du système nerveux, c'est-à-dire le tissu interstitiel, les capillaires sanguins et surtout les cellules gliales qui forment l'environnement immédiat des neurones, en particulier les astrocytes qui nourrissent et modulent l'activité neuronale. Enfin, il faut savoir que dans la cellule nerveuse malade, de nombreuses voies biochimiques sont altérées. Le rétablissement du fonctionnement d'une seule voie de signalisation déficiente n'est peut-être pas suffisant pour stopper l'évolution de la maladie. Il faut probablement rétablir le fonctionnement de l'ensemble des voies métaboliques considérées comme potentiellement anormales. Par conséquent, s'il y a plusieurs voies métaboliques qui dysfonctionnent, le traitement d'une maladie neurodégénérative ne devrait reposer que sur une polychimiothérapie. Or les médicaments actuels ne visent à éliminer que les seules plaques séniles.

Quelle est la part des facteurs génétiques et environnementaux dans l'étiologie de ces maladies ?
La maladie d'Alzheimer est très peu héréditaire. Dans celle de Parkinson, les formes familiales ne représentent pas plus de 10 % des cas. Par conséquent, les facteurs acquis doivent être pris en compte. Les études épidémiologiques sur les facteurs de risque ne montrent pas de causes évidentes. Un tiers des malades d'Alzheimer présentent des lésions vasculaires, mais tout le monde en a.
Dans la maladie de Parkinson, l'exposition à certains pesticides est reconnue comme un facteur favorisant. Globalement, les facteurs environnementaux possibles sont au nombre de quatre : les virus, les bactéries, des protéines anormales ou des substances toxiques. Pour l'instant, il n'y a pas de facteurs extérieurs connus pour jouer un rôle déterminant. Mais, si facteur environnemental il y a, sa contribution est peut-être plus subtile. Il peut s'agir de substances apparemment inoffensives, qui, à doses infimes, deviennent délétères pour certains individus présentant plusieurs facteurs de vulnérabilité. À moins qu'il ne s'agisse d'un enchaînement impliquant plusieurs facteurs environnementaux. Par exemple, une infection bactérienne à l'origine d'une déficience immunitaire localisée qui permet la multiplication d'un type de virus, laquelle déclenche la production de protéines pathologiques… C'est un peu naïf de penser qu'il n'y a, à chaque fois, qu'une seule cause ou une seule cascade d'événements pour chaque maladie.

SÉBASTIEN SINDEU/ DIVERGENCE

Maintenir le lien social permet aux personnes atteintes de maladies neurodégénératives de stimuler leur mémoire (ici le village Alzheimer à Dax, dans les Landes).

Quand on regarde au microscope le cerveau d'un malade, les signes de la maladie sont-ils incontestables ?
Au microscope, les pertes de neurones sont visibles chez des malades, alors qu'en cas de vieillissement normal, ce sont les connexions nerveuses qui disparaissent. Dans les formes évoluées de la maladie, la quantification de la perte neuronale est aisée. En revanche, évaluer la souffrance neuronale, c'est-à-dire les neurones malades n'ayant pas encore disparu, s'avère plus difficile. La durée de vie d'un neurone malade, nous ne la connaissons pas. Quant aux stigmates histopathologiques — les plaques séniles dans Alzheimer ou les corps de Lewy dans Parkinson —, on en trouve aussi chez les sujets normaux à partir de 50 ans, certes en petite quantité et dans des régions différentes. C'est à se demander si à 130 ans, nous n'aurions pas tous un Alzheimer ! Donc, je m'interroge : pourquoi ces stigmates sont considérés comme pathologiques dans une maladie d'Alzheimer alors qu'ils ne le sont pas dans le cerveau de sujets sains ? Chercher un médicament pour limiter le vieillissement, ce n'est pas pareil que d'en chercher un pour cette maladie… Et puis, on peut se poser la question : quelle différence entre un vieillissement cérébral accéléré et une maladie d'Alzheimer d'évolution lente ? Il faut tout de même garder à l'esprit que le tableau clinique de cette pathologie n'a rien à voir avec un vieillissement cérébral normal.

L'association des signes cliniques et de la perte neuronale permet-elle de poser des diagnostics avec certitude ?
Les pièges diagnostiques sont encore nombreux. On estime que le taux d'erreur est de l'ordre de 10 %. Au début, la différence entre une maladie d'Alzheimer d'évolution lente et un vieillissement rapide n'est pas claire. D'autant que le vieillissement se fait, en quelque sorte, en pièces détachées. Par exemple, avoir des troubles de l'équilibre, alors que la mémoire est intacte, ou *vice versa*. C'est dire que, pour toute maladie neurodégénérative, il faut revoir le malade quelques mois après la première consultation pour être sûr du diagnostic.
Pour une maladie d'Alzheimer, en cas de doute, il faut absolument s'assurer du diagnostic, car les conséquences sont majeures pour le patient et son entourage : avant tout, des tests neuropsychologiques, si possible une IRM cérébrale, voire une ponction lombaire pour mesurer la concentration de protéines bêta-amyloïdes.

Aujourd'hui, il n'existe pas de traitement curatif, mais a-t-on des moyens de prévention efficaces ?
Pour compenser les symptômes, oui. En revanche, pas pour ralentir l'évolution de la maladie. Dans la maladie de Parkinson, les médicaments permettent d'améliorer les symptômes en rétablissant le fonctionnement des neurones dopaminergiques déficients *(lire p. 61)*. Mais, malheureusement, d'autres neurones seront touchés avec l'évolution de la maladie, ce qui explique l'apparition d'autres symptômes, par exemple des troubles de l'équilibre (qui résistent au traitement). Dans ces cas, des exercices physiques, intellectuels et surtout la poursuite de l'interaction sociale sont recommandés. Le travail du physiothérapeute consiste à renforcer les fonctions déficientes et à développer celles qui sont épargnées pour essayer de compenser. Par exemple, quelqu'un qui a de grosses difficultés pour marcher a tout intérêt à multiplier les activités intellectuelles. Comme notre cerveau est malléable, tous les exercices — intellectuels, émotionnels et physiques — favorisent le rétablissement des connexions nerveuses, et limitent donc l'aggravation des symptômes.
Cependant, nous n'avons pas la preuve qu'entraîner son cerveau ralentit l'évolution de la maladie. On a longtemps dit que le fait de s'instruire pouvait protéger de la maladie d'Alzheimer. Le plus vraisemblable est que si vous partez d'un potentiel intellectuel élevé, l'apparition des premiers troubles cognitifs est moins rapidement perceptible que chez des sujets qui partent d'un niveau intellectuel bas. ■

Propos recueillis par C. C.

PUBLICATIONS

- **Je m'amuse à vieillir,** Odile Jacob, 2020.
- **Je marche, donc je pense** (avec Roger-Pol Droit), Albin Michel, 2022.
- **Le Cerveau, machine à inventer,** Albin Michel, 2023.

Les 5 nouvelles voies contre Parkinson

Au-delà du traitement classique par la dopamine, de nombreuses pistes innovantes se développent contre cette affection neurodégénérative dont le nombre de cas devrait exploser dans les prochaines années. Passage en revue de ces thérapies d'avenir.

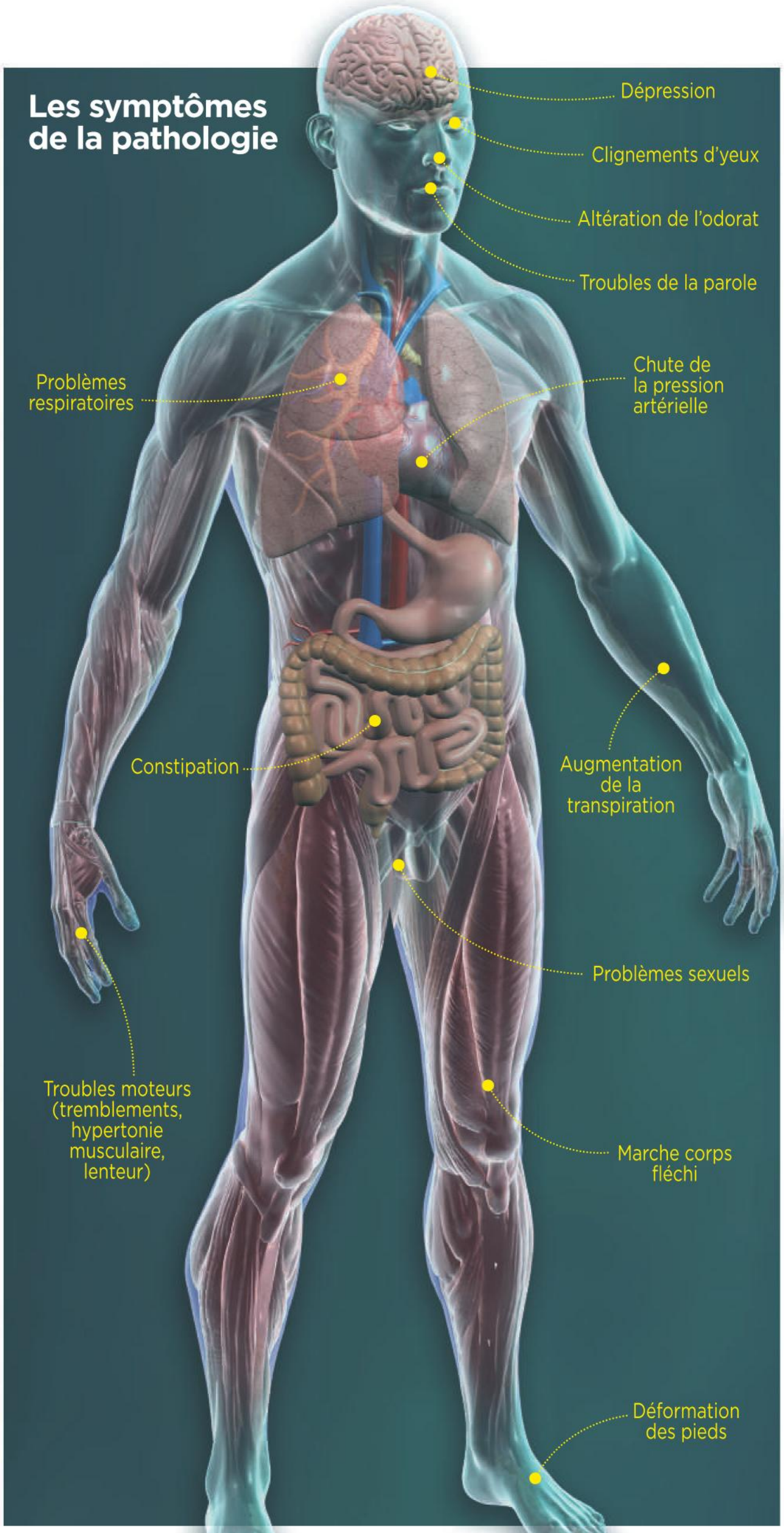
Voilà deux cents ans, le Dr James Parkinson (1755-1824) proposait les descriptions pionnières d'une maladie caractérisée par des tremblements, des mouvements plus lents et une rigidité. Cinquante ans après sa mort, le neurologue français Jean-Martin Charcot nomma la maladie de son nom. Il faudra encore un demi-siècle pour que le neuropathologiste russe Constantin Tretiakoff en trouve l'origine, en 1919 : la destruction de neurones situés dans la « substance noire » du cerveau, ceux qui synthétisent la dopamine, un neurotransmetteur indispensable au contrôle des mouvements. Ce n'est enfin que dans les années 1960 que fut proposé le premier traitement, la L-dopa, qui consiste à compenser la perte de production de dopamine par son apport par des médicaments. Ceux-ci sont toujours prescrits, mais leur efficacité ne dure que quelques années et les symptômes reviennent, de plus en plus difficiles à contrôler.

Dans les années 1990, une approche nouvelle est proposée par deux Français, les professeurs Alim-Louis Benabid et Pierre Pollak à Grenoble : la stimulation cérébrale profonde. Elle consiste à implanter dans le cerveau deux électrodes pour stimuler électriquement les noyaux subthalamiques, une zone de la taille d'un grain de riz. Las ! cette technique ne peut être proposée qu'à un petit nombre de patients, âgés de moins de 70 ans et atteints d'une forme particulière de la maladie. Soit moins de 10 % du nombre total de malades. L'un des défis des neurochirurgiens est de savoir les identifier. C'est l'objet de l'étude Predi-Stim, démarrée il y a dix ans à Lille. Ses résultats, présentés au printemps, *« visent à mieux guider les neurochirurgiens dans le choix des patients et à éviter les "loupés"* », précisait son coordonnateur, le Pr David Devos. Mais cela ne suffira pas. Santé publique France annonce une explosion du nombre de cas dans les prochaines années : +56 % entre 2015 et 2030.

1 La dopamine est délivrée directement dans le cerveau

Prendre de la dopamine (ou plutôt son précurseur, la L-dopa en comprimés), tel est aujourd'hui le traitement de référence de la maladie. Quand celui-ci devient avec le temps moins efficace, l'autre possibilité est de recevoir non pas de la dopamine mais de l'apomorphine, une substance à l'action antiparkinsonienne délivrée au moyen d'une pompe disposée sous la peau. Mais depuis un an, une nouvelle approche est expérimentée en France : perfuser le précieux neurotransmetteur directement dans le cerveau, de manière continue 24 heures sur 24. Cette première mondiale nommée Dive (dopamine intra cérébro-ventriculaire) fait l'objet d'un essai clinique. Elle s'adresse à des patients atteints de la maladie de Parkinson au stade de complications du traitement oral, une situation fréquente survenant entre cinq et huit ans après les premières prises, marquée par des blocages et des dyskinésies, des mouvements anormaux involontaires traduisant un surdosage en dopamine. Ces travaux sont le fruit d'un partenariat entre le campus de Lille, l'Inserm, le CHU de Lille et la start-up InBrain Pharma. En avril, les premiers résultats sur une douzaine de patients ont été publiés : ils faisaient état d'une quasi-disparition des mouvements involontaires, avec à la clé une réduction de 70 % des prescriptions orales. Avec, même, un arrêt possible chez l'un d'eux. Des résultats qui devront être confirmés sur un plus grand groupe de patients.

Cette approche repose sur le même principe qu'une pompe à insuline

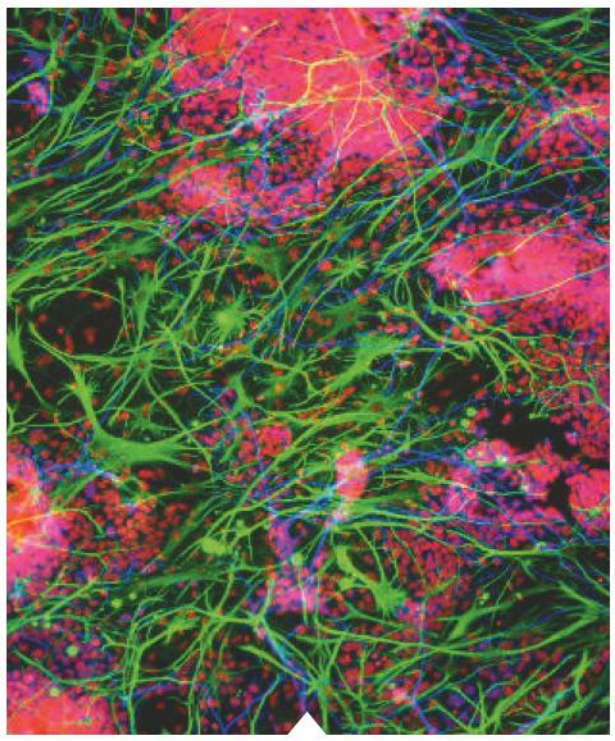


administrant en continu l'hormone manquante qui n'est plus sécrétée par le pancréas. Mais ici, le dispositif est complété par un cathéter qui passe sous la peau pour aller délivrer la molécule de manière continue dans le cerveau. Une méthode invasive nécessaire car la dopamine ne peut pas traverser seule la barrière qui protège le cerveau, dite hémato-encéphalique. Autre obstacle : la dopamine s'oxyde et se dégrade très vite. Aussi, l'équipe a optimisé son administration en condition anaérobie (sans oxygène), pour la préserver au mieux. Dernier avantage de cette stratégie : une intégration totale de la pompe et de son système d'administration dans le corps. L'essai en cours auprès d'une douzaine de patients doit durer jusqu'en 2024, Inbrain Pharma ayant prévu de lancer alors un essai de phase 3 sur une centaine de patients en Europe.

2 Une greffe de neurones dopaminergiques

L'idée est simple : il s'agit ici de réintroduire des cellules qui synthétisent la dopamine pour compenser la production manquante. Une approche qui est déjà expérimentée. « *C'est un essai qui pourrait transformer le traitement de la maladie de Parkinson* », déclarait à l'automne 2022 le Pr Roger Barker, l'un des scientifiques de l'université de Cambridge (Royaume-Uni) impliqué dans une première mondiale, l'essai Stem-PD en collaboration avec l'hôpital universitaire de Skåne (Suède). Si les premiers essais *in vitro* ont démarré à la fin des années 1950, il a fallu attendre début 2023 pour que le premier essai clinique voit le jour. Démarrée chez un premier patient, l'étude repose sur l'injection intracérébrale de cellules souches embryonnaires programmées pour devenir à terme des neurones synthétisant de la dopa-

mine. Après des résultats encourageants sur des modèles animaux démontrant qu'il est possible de corriger des déficits moteurs de la maladie de Parkinson, les chercheurs suédois ont développé une technologie permettant de se passer des cellules fœtales. Ils ont choisi d'utiliser des cellules souches embryonnaires humaines, capables de se transformer en presque n'importe quel type de cellule dans le corps, et les ont programmées pour qu'elles se substituent aux cellules déficitaires des malades. Avec Stem-PD, les chercheurs ont eu recours à un instrument chirurgical déjà utilisé à l'hôpital suédois pour des greffes de neurones requises dans certains cas de microchirurgie neurologique.
Ils ont alors pu greffer en intracérébral des cellules qui doivent désormais réparer les structures endommagées du cerveau, remplacer les neurones perdus et permettre la synthèse de la dopamine. En février, à l'issue de l'inclusion du premier patient, la chercheuse principale de l'essai, Gesine Paul-Visse, neurologue à Lund (Suède), précisait *« que la transplantation s'était déroulée comme prévu, que l'emplacement correct de l'implant cellulaire, ici le putamen, avait été confirmé par une imagerie par résonance magnétique »*. *« Une région qui ne dépasse pas 4 millimètres »*, précise le neurochirurgien Hjálmar Bjartmarz, ayant effectué la transplantation. *« Stem-PD est un essai de sécurité, qui doit évaluer l'innocuité et la tolérabilité, insiste aujourd'hui la neurologue. Son efficacité est un objectif secondaire. Nous allons suivre les huit patients, quatre en Suède et quatre au Royaume-Uni, pendant au moins trente-six mois. D'après nos travaux préalables, les premiers effets devraient être observables à partir de six mois. »*



SILVIA RICCARDI / SPL / SUCRÉ SALÉ

Issus de cellules souches embryonnaires, les nouveaux neurones se substituent aux cellules déficitaires des malades.

S'il est prévu que les patients poursuivent leur traitement de dopamine — qui pourra être ajusté au fur et à mesure de l'essai —, deux dosages cellulaires différents ont été programmés. *« L'un pour créer au moins 100 000 neurones dopaminergiques, l'autre 200 000 »*, précise le Dr Malin Palmar, du département de neurobiologie régénératrice de l'université de Lund, qui a travaillé en étroite collaboration avec ses collègues britanniques. Alors que les premiers résultats ne seront pas publiés avant au moins un an et demi, des critiques circulent déjà quant à l'efficacité de cette approche. Telles celles publiées dès 2022 dans le *Journal of Neurosurgery*, émanant du Pr Ron Alterman, neurochirurgien au Centre médical des diaconesses Beth Israel à Boston (États-Unis). L'un de ses arguments invoque la particulière puissance de l'effet placebo de la chirurgie cérébrale dans la maladie de Parkinson, la dopamine étant un neurotransmetteur intervenant aussi bien dans les circuits de récompense et d'attente que dans ceux qui contrôlent le mouvement.

3 La surprenante piste des ultrasons

Comment ouvrir la fameuse barrière hemato-encéphalique — la membrane entourant le cerveau — et se servir de cette brèche pour administrer de nouveaux médicaments ? En octobre 2020, une équipe canadienne du Sunnybrook Hospital, à Toronto, a pour la première fois démontré que les ultrasons focalisés d'une échographie au niveau du cerveau permettaient d'agir pour améliorer l'état des patients parkinsoniens. En février, d'autres travaux internationaux publiés dans la revue *New England Journal of Medicine* ont également eu recours aux ultrasons mais dans un autre but : celui de détruire de manière unilatérale une zone précise, le globus pallidum, une structure cérébrale profonde connue pour être impliquée dans le contrôle des mou-

DISPOSITIF

Prévenir grâce aux montres connectées

Les montres connectées — ou smartwatches — peuvent identifier des signes précoces imperceptibles de la maladie de Parkinson jusqu'à sept ans avant le diagnostic clinique. C'est l'impressionnante démonstration publiée dans *Nature Medicine* par une équipe de l'université de Cardiff (Grande-Bretagne) et de l'institut britannique de recherche sur les démences. *« Nous savons qu'au fur et à mesure que la maladie de Parkinson se développe, la vitesse de déplacement change,* explique le Dr Kathryn Peall. *Nous avons donc cherché à savoir si l'accéléromètre pouvait analyser des signes avant-coureurs de la maladie et permettre ainsi un diagnostic plus précoce. »* De fait, au moment où les symptômes caractéristiques de la maladie permettent de poser un diagnostic, 50 à 70 % des cellules de la substance noire ont déjà disparu. Conduite à partir des données de 103 712 participants porteurs d'une montre connectée, l'étude montre que l'exploitation par un algorithme d'intelligence artificielle de l'enregistrement en continu des mouvements se révèle plus fiable à la prédiction que tout autre facteur de risque connu. H. J.

vements volontaires. Une centaine de patients ont été inclus dans l'essai, munis d'un casque spécial administrant des ultrasons. Avec une particularité : ils étaient totalement éveillés et pouvaient échanger avec les médecins, ce qui a permis aux neuroradiologues de surveiller en direct les effets immédiats de l'ablation des tissus cérébraux et de faire les ajustements nécessaires au cours de l'intervention.

Mais l'originalité de ce travail, qui repose sur une approche non invasive et sans incision chirurgicale, est d'avoir comparé deux groupes de patients : l'un dit d'intervention (69 personnes), où les personnes ont bénéficié des ultrasons, et un second groupe dit témoin (25), chez qui le casque ne délivrait aucun ultrason, la procédure étant simulée et factice. Les résultats montrent que c'est dans le premier groupe que l'amélioration des symptômes a été la meilleure, selon les questionnaires d'évaluation remplis par les malades ; deux tiers d'entre eux en ont même conservé le bénéfice un an plus tard, avec toutefois quelques effets indésirables (difficultés d'articulation, perte du goût, troubles visuels). Des résultats préliminaires à considérer avec précaution car ce travail a été financé par la firme israélienne Insightec, fabriquant le dispositif Exablate utilisé dans l'étude. Pour les auteurs, cette ablation unilatérale par ultrasons du pallidum pourrait néanmoins constituer une piste thérapeutique encourageante. Elle devra cependant être confirmée et, encore mieux, comparée aux autres techniques également en cours d'exploration.

4 Réveiller les neurones par infrarouge

Et si les parkinsoniens pouvaient être soignés par la lumière ? Le projet NIR (near infra red ; *lire* S. et A. *n° 907*) consiste à traiter la maladie par « photo-biomodulation », c'est-à-dire en envoyant au plus près des neurones des rayons lumineux d'une longueur d'onde proche de celle de l'infrarouge, grâce à un dispositif médical implanté afin de ralentir leur dégénérescence et la progression de la maladie. Douze ans de travaux, des tests prometteurs chez l'animal et quelques brevets ont été nécessaires pour la mise au point du dispositif final constitué de trois parties : un stimulateur fournissant l'énergie implanté sous la clavicule du patient, un boîtier optique placé dans la boîte crânienne et, enfin, une fibre optique passée dans les ventricules du cerveau. Les travaux préliminaires, conduits entre autres par John Mitrofanis, neuroanatomiste à l'université de Sydney (Australie) ayant rejoint en 2021 Clinatec (Grenoble), ont été réalisés sur des souris parkinsoniennes. Ils ont montré que la lumière peut réactiver des neurones endormis et relancer leur sécrétion de dopamine. Mais seulement si celle-ci est émise à l'intérieur de la boîte crânienne, sinon elle est absorbée par les os et les tissus avant d'atteindre

UNIVERSITY OF MARYLAND.

Le traitement par ultrasons focalisés guidés par imagerie permet de réduire les tremblements des malades (ici à la faculté de médecine de l'université du Maryland, aux États-Unis).

les neurones dopaminergiques. Porté par Cécile Moro, directrice de recherche au Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), le projet de Clinatec vise aujourd'hui à ralentir la progression de la maladie. L'essai clinique mené par le Pr Stephan Chabardès (CHU de Grenoble) inclura à terme 14 patients. En avril, ce projet a reçu l'un des prix NetExplo qui récompensent chaque année des innovations numériques.

5 Soigner par le mouvement

C'est dans les années 2000 que les premières études ont révélé que les malades réduisaient leurs activités physiques quotidiennes d'environ 30 % plusieurs années avant la pose du diagnostic, la diminution étant d'autant plus importante que la maladie est sévère et que la personne vieillit. Aujourd'hui, l'exercice physique est devenu un allié primordial dans le traitement, mais aussi en prévention. Les travaux menés chez l'animal ont démontré que l'activité physique augmente la production d'énergie par les mitochondries (les usines énergétiques de nos cellules), stimule les défenses antioxydantes de l'organisme, réduit les phénomènes inflammatoires conduisant à la dégénérescence des neurones et augmente la production des connexions entre ces derniers. Ce potentiel effet neuroprotecteur reste toutefois à démontrer chez l'humain. Les essais cliniques ont, eux, bien mis en évidence que bouger diminue le risque de chute, améliore les performances motrices et cognitives et, par conséquent, la qualité de vie. Dans un document datant de l'été 2022, relatif à la prescription d'activité physique chez les parkinsoniens, la Haute Autorité de santé précise que les activités physiques d'endurance ont démontré un effet positif sur l'équilibre, la vitesse de marche, la qualité de vie et le risque de chutes. C'est le cas avec la pratique du tai-chi (soixante minutes, deux fois par semaine pendant vingt-quatre semaines), la marche ou le yoga (deux fois par semaine pendant huit semaines). Sans oublier la danse. Car bouger sur n'importe quel rythme améliore aussi l'équilibre, le périmètre de marche et de plus est bien perçu par les patients, en favorisant le lien social. En prime, ces derniers développent leur audition car se mouvoir sur le tempo sollicite leur attention au rythme, et donc leur écoute.

Même si les mécanismes physiopathologiques de l'activité physique restent à élucider, cette intervention sur le mode de vie présente à ce jour le plus d'intérêt en raison de ses autres bénéfices comme l'amélioration des capacités musculaires et cardio-respiratoires, la réduction de l'hypertension, un sommeil de meilleure qualité et une diminution de la dépression. ■ **S. R. M.**

AMELIE-BENOIST / IMAGE POINT FR / BSIP

L'ergothérapie et la kinésithérapie ont un effet neuroprotecteur, mais permettent aussi aux malades d'améliorer leur équilibre, leur vitesse de marche et leur qualité de vie.

THÉRAPEUTIQUES

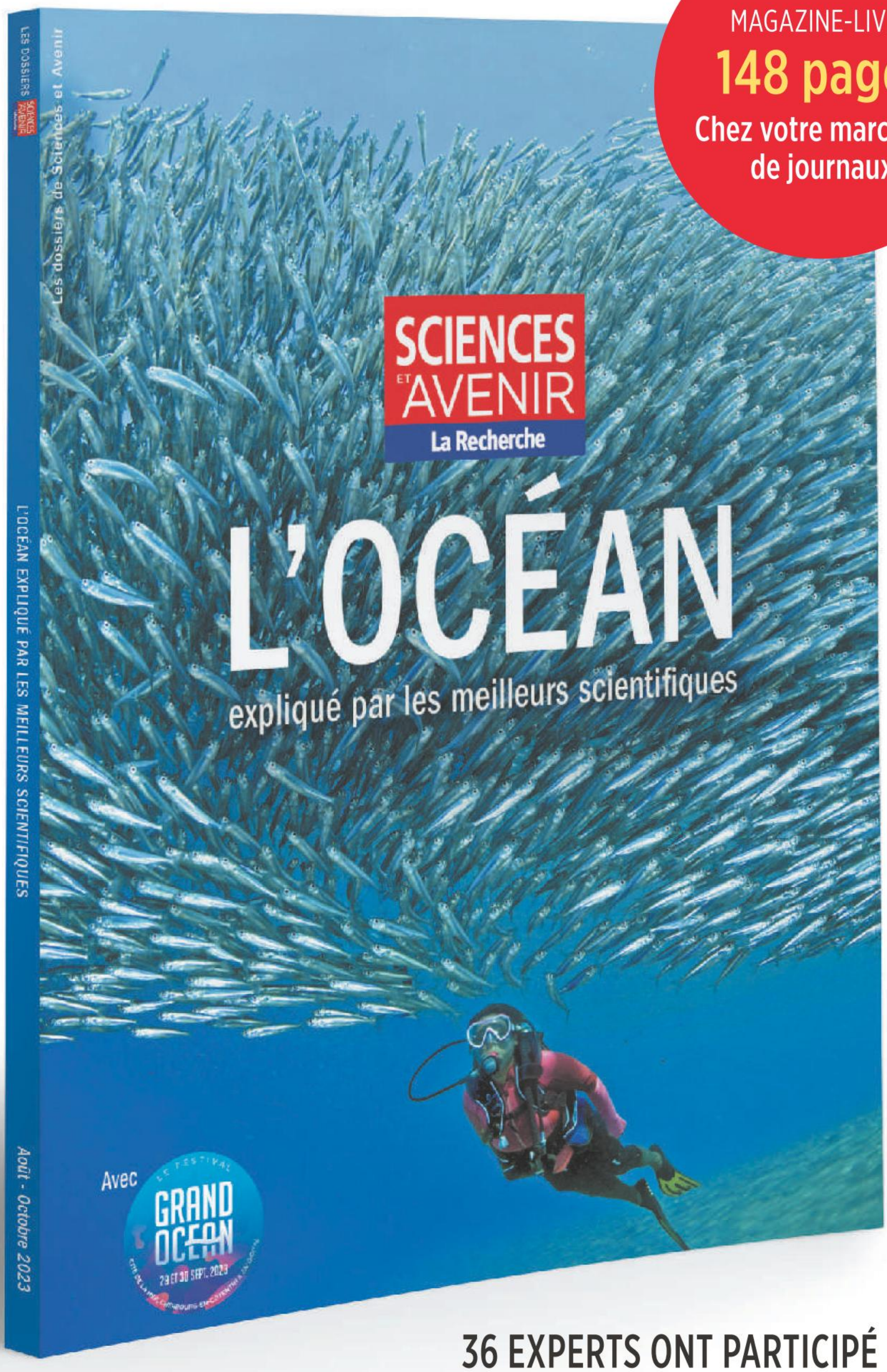
D'autres médicaments à l'étude

Viser l'alpha-synucléine, cette protéine dont l'accumulation anormale joue un rôle dans le développement de la maladie de Parkinson, tout comme celle de tau pour Alzheimer *(lire p. 52)*, tel est l'enjeu des travaux en cours dits d'immunothérapie. Ceux-ci développent des molécules (cinpanémab, prasinézumab…) dirigées contre différents fragments protéiques de l'alpha-synucléine. Mais la relation entre l'accumulation de cette protéine et la mort neuronale fait encore débat. D'autres pistes, comme agir sur le fer qui lui aussi est stocké au niveau cérébral des parkinsoniens, sont à l'étude. Une molécule, la déféripone, fait ainsi l'objet d'un essai clinique, Fairpark. De premiers résultats encourageants ont été publiés en décembre 2022 dans la revue *New England Journal of Medicine*.

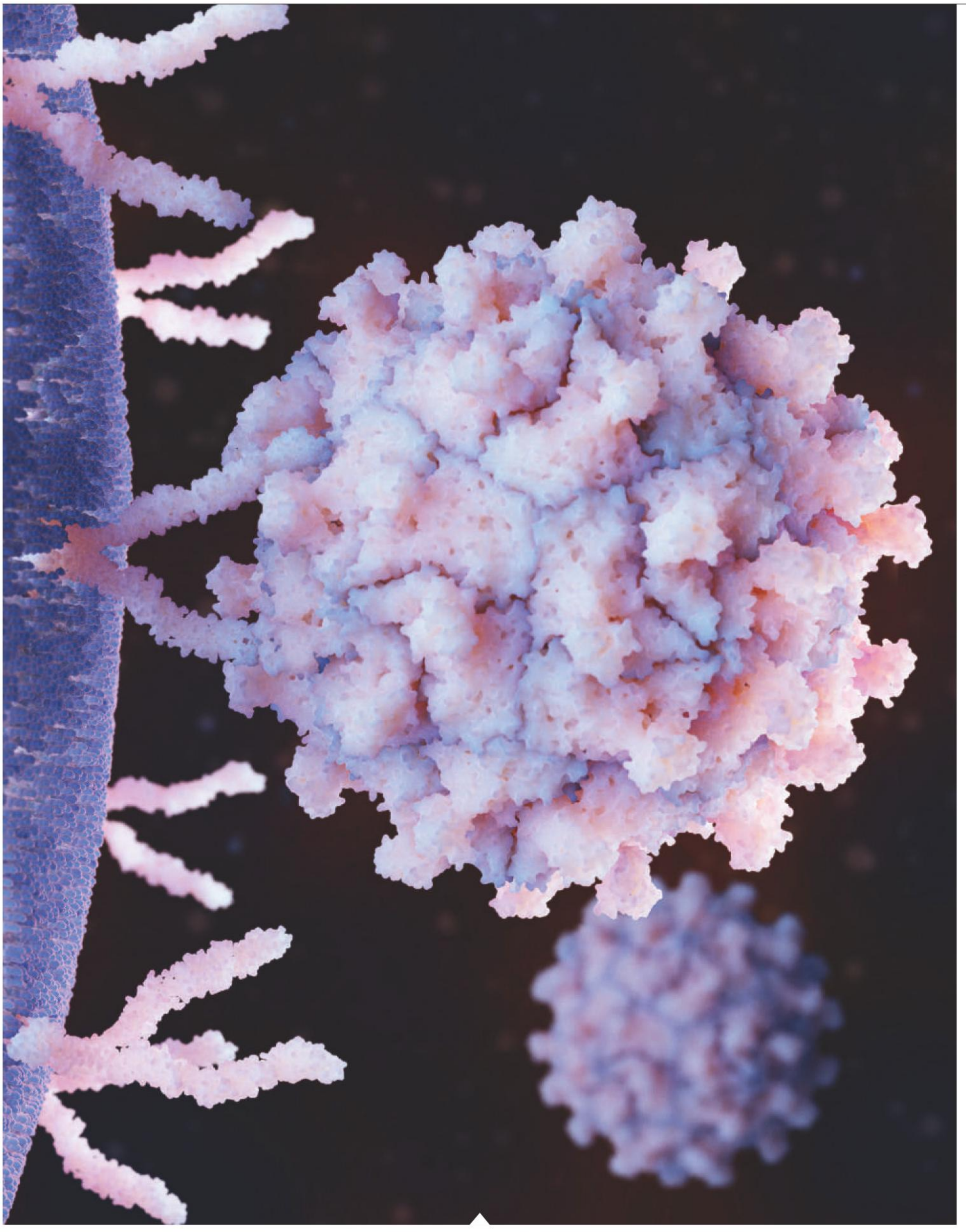
MAGAZINE-LIVRE

148 pages

Chez votre marchand de journaux



36 EXPERTS ONT PARTICIPÉ À CE NUMÉRO SPÉCIAL



JUAN GAERTNER / SCIENCE PHOTO LIBRARY / SUCRÉ SALÉ

L'infection par le virus Coxsackie B (illustration) de sujets prédisposés génétiquement au diabète de type 1 semble être l'événement déclencheur de la maladie. Cette affection auto-immune représente 10 % des cas de diabète en France.

AUTO-IMMUNITÉ Dysfonctionnement conduisant le système immunitaire à s'attaquer à certaines cellules ou protéines normales de l'organisme qu'il est censé défendre. Il est à l'origine de quelque 80 maladies comme le diabète de type 1 ou la sclérose en plaques.

LYMPHOCYTE Globule blanc dont le rôle est de défendre l'organisme. Il se distingue des autres en ce qu'il n'est pas formé dans la moelle osseuse mais dans des organes dits lymphoïdes (ganglions, rate, etc.).

ANTICORPS Protéines fabriquées par certains globules blancs (lymphocytes) en réaction à l'intrusion dans un organisme d'une substance étrangère (antigène).

Virus

Pourquoi ils détraquent l'immunité

C'est avéré : certaines infections virales jouent un rôle dans la survenue de maladies auto-immunes. Ainsi, la preuve est désormais apportée que deux virus peuvent être impliqués dans le diabète de type 1 et la sclérose en plaques. Ces liens justifient le choix de certains laboratoires de développer des vaccins ciblés. Explications.

Par Hugo Jalinière @HugoJaliniere

Et si une simple vaccination contre des virus communs suffisait à empêcher le déclenchement d'un « diabète de l'enfant » (type 1) ou d'une sclérose en plaques chez le jeune adulte ? C'est l'espoir — pas si fou — nourri par les récentes découvertes sur le rôle des infections virales dans la survenue de maladies auto-immunes : il existe un événement déclencheur, un point zéro identifiable à certaines de ces pathologies, caractérisées par un retournement soudain du système immunitaire contre l'organisme qu'il est censé défendre. Les soupçons qui pesaient en particulier sur deux virus depuis vingt ans sont quasiment confirmés : les Coxsackie B sont impliqués dans le diabète de type 1 ; et l'infection par le virus Epstein-Barr déclenche la sclérose en plaques. Bien sûr, l'infection fatidique intervient toujours sur un terrain de prédisposition génétique ou immunologique propice à l'auto-immunité. Dans le cas du diabète de type 1, ce sont les cellules bêta-pancréatiques chargées de produire l'insuline dans le corps qui, dès ▶

l'enfance, sont soudainement prises pour cible et détruites. La sclérose en plaques, elle, se déclare dans le système nerveux central : des cellules immunitaires s'attaquent à la myéline, une gaine de protéines entourant les neurones et favorisant l'influx nerveux.

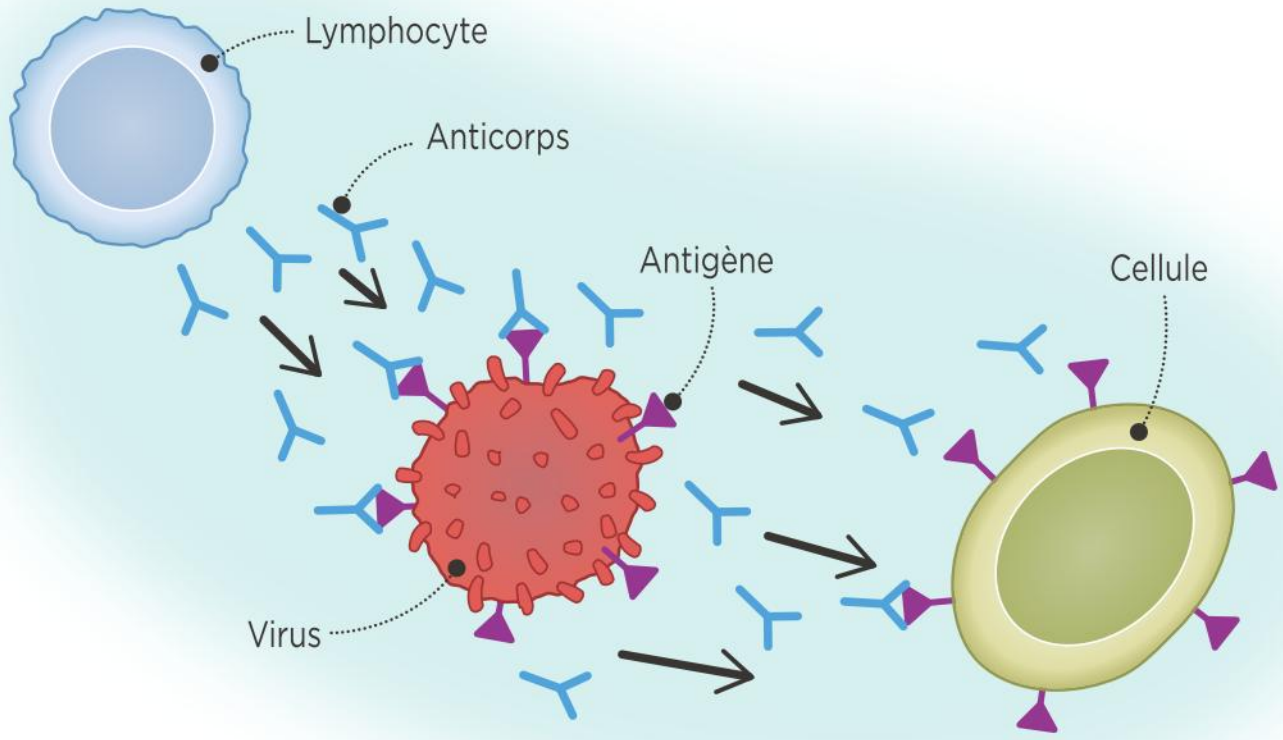
« Pour le diabète de type 1, il ne fait plus guère de doute que l'infection par un virus Coxsackie B chez des sujets prédisposés génétiquement soit l'événement déclencheur de l'auto-immunité contre les cellules du pancréas productrices d'insuline », explique le Pr Roberto Mallone. À l'institut Cochin, à Paris, son équipe explore les réactions immunitaires à cette infection pouvant conduire à l'auto-immunité diabétique.

Un premier candidat-vaccin pour le diabète de type 1

Touchant plus de 95 % de la population mondiale, l'infection est le plus souvent bénigne voire asymptomatique, mais elle peut aussi dégénérer dans de rares cas en encéphalites, myocardites ou méningites, en particulier chez les enfants et les personnes immunodéprimées. Quoi qu'il en soit, *« nous avons désormais beaucoup de données épidémiologiques qui établissent ce lien avec le diabète de type 1, en particulier sur des infections prolongées,* poursuit Roberto Mallone. *Elles sont renforcées par les études histopathologiques [analyse des tissus au microscope] sur le pancréas de personnes diabétiques de type 1. On y voit les marqueurs de l'infection virale avec une infiltration de cellules immunitaires dans le pancréas, où se trouvent les cellules bêta fabriquant l'insuline. »*

C'est sur cette base qu'une biotech américaine créée en 2016, Provention Bio, a développé le premier candidat-vaccin contre les souches de Coxsackie B impliquées dans le diabète de type 1. *« Le PRV-101 pourrait être le premier vaccin à prévenir jusqu'à 50 % l'incidence du diabète de type 1 »*, déclarait la société après l'annonce en 2022 des résultats convaincants de son essai de phase 1. Sur six mois de tests, le vaccin était à la fois très bien toléré et induisait de forts taux d'anticorps neutralisants. Provention Bio ayant déjà atteint la phase de commercialisation d'un autre produit d'importance contre le diabète, ces résultats ont été pris très au sérieux. En mars dernier, le géant pharmaceutique français Sanofi a racheté la société pour un montant total de 2,9 milliards de dollars.

Le mimétisme moléculaire à la loupe



L'auto-immunité peut se déclencher lorsqu'un antigène viral (violet) ciblé par le système immunitaire (lymphocyte et anticorps en bleu) se révèle analogue à un motif moléculaire déjà présent dans l'organisme. Les anticorps s'attaquent alors aux cellules saines.

BRUNO BOURGEOIS

« Le test d'un vaccin est une bonne chose, car c'est la seule façon d'obtenir la preuve formelle du lien de cause à effet entre l'infection et l'auto-immunité », estime Roberto Mallone. Mais son équipe, elle, cherche toujours à expliquer comment se produit le retournement de situation immunitaire. Dans une étude en cours de publication, menée sur des cellules humaines *in vitro*, trois scénarios pouvant expliquer le déclenchement de l'auto-immunité par l'infection sont testés.

Comprendre le comportement du virus dans l'organisme

Le premier scénario est celui d'un effet direct du virus : les Coxsackie B infectent les cellules bêta-pancréatiques, les détruisent et larguent des antigènes dans un contexte inflammatoire propice à la réaction auto-immune. Deuxième scénario : un effet indirect de la réponse immunitaire vis-à-vis du virus lui-même qui s'emballe jusqu'à se tromper de cible. Enfin, le scénario du mimétisme molé-

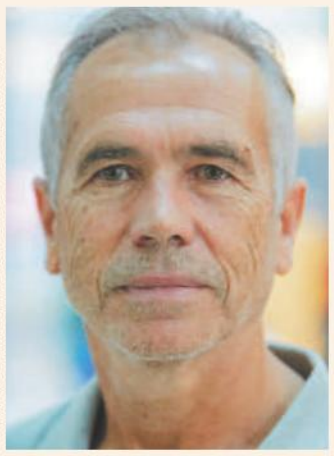
Une étude épidémiologique de 2022 démontre pour la première fois le rôle décisif du virus Epstein-Barr dans le développement de la sclérose en plaques

culaire *(voir l'infographie)* : des motifs moléculaires à la surface du virus sont tellement similaires à ceux d'autres cellules, saines, de l'organisme (myéline dans le cas de la sclérose en plaques, cellules bêta dans le diabète) que le système immunitaire, en s'attaquant aux premières, va se mettre à attaquer aussi les secondes. *« Savoir précisément ce qui se passe est essentiel pour évaluer la pertinence d'un vaccin,* précise Roberto Mallone. *Si c'est un effet direct du virus, une vaccination neutralisante serait probablement une très bonne option. À l'inverse, si l'auto-immunité est due à un effet indirect de la réponse immunitaire au virus, un vaccin risquerait d'accélérer le déclenchement de la maladie… Et dans le cas du mimétisme moléculaire, il faudra neutraliser les séquences d'antigènes viraux trop similaires à ceux qu'on veut protéger.* » La réponse est dans l'étude que son équipe à soumis pour relecture. *« Je ne peux pas vous donner le coupable ! Mais nos conclusions ne remettent pas en cause la pertinence potentielle d'un vaccin. »*

Le virus Epstein-Barr impliqué dans 7 maladies auto-immunes

Un espoir similaire d'empêcher la sclérose en plaques (SEP) est né en 2022 après la publication dans *Science* d'une étude épidémiologique d'ampleur colossale *(lire ci-contre)* démontrant pour la première fois le rôle déterminant du virus Epstein-Barr (EBV) dans le développement de cette maladie du système nerveux central. Le lien suspecté depuis 2003 est aujourd'hui difficile à ignorer, même si, à l'instar des Coxsackie B pour le diabète, il reste à éclaircir les mécanismes intimes à l'origine de l'auto-immunité. *« La grande majorité des personnes infectées par l'EBV ne développent pas de sclérose en plaques, ce qui indique que l'infection, si elle est nécessaire, n'est pas suffisante »*, rappelle Évelyne Manet, directrice de recherche au Centre international de recherche en infectiologie de Lyon. Plus de 90 % de la population est, à un moment ou à un autre, touchée par l'EBV, généralement sans conséquence. La première infection a lieu le plus souvent pendant la petite enfance de manière asymptomatique. Mais lorsqu'elle survient plus tard, dès l'adolescence, elle peut provoquer une mononucléose infectieuse voire des lésions précancéreuses dans l'estomac. Une étude parue dans *Nature Genetics* en 2018 évoquait même la possibilité que le virus soit à l'origine de pas moins de sept maladies auto-immunes différentes : outre la sclérose en plaques, les chercheurs américains listaient la polyarthrite rhumatoïde, le lupus systémique, l'arthrite juvénile, le syndrome de l'intestin irritable, la maladie cœliaque et… le diabète de type 1, aussi.

De quoi sérieusement raviver l'intérêt des laboratoires pour un vaccin contre ce virus. Dès janvier 2022, c'est Moderna qui a dégainé le premier candidat-vaccin, aujourd'hui testé en essai clinique de phase 2 sur 270 adultes. Cinq mois plus tard ce sont les Instituts nationaux ▶


HARVARD T.H. CHAN SCHOOL OF PUBLIC HEALTH

VERBATIM

ALBERTO ASCHERIO

PROFESSEUR D'ÉPIDÉMIOLOGIE À L'ÉCOLE DE SANTÉ PUBLIQUE HARVARD T. H. CHAN, À BOSTON (ÉTATS-UNIS)

« L'infection précède toujours la sclérose en plaques »

“Le lien entre l'infection très courante par le virus Epstein-Barr (EPV) et la survenue d'une sclérose en plaques (SEP) était suspecté depuis plus de vingt ans. Pourtant, l'idée dominait que cette association n'impliquait pas de lien de causalité. Probablement parce qu'il est très difficile d'établir une telle relation de cause à effet avec un virus qui infecte à peu près tout le monde sur la planète. Or, c'est précisément le cas. C'est ce que nous sommes parvenus à montrer grâce à une étude épidémiologique sans précédent. Celle-ci a consisté à suivre sur vingt ans, de 1993 à 2013, plus de 10 millions de jeunes adultes engagés dans l'armée américaine. Nous disposions d'échantillons sanguins prélevés au moment de leur intégration, puis tous les deux ans. Parmi eux, 801 ont développé une sclérose en plaques au cours de la période de suivi. Tous, sauf un, avaient été infectés par l'EBV dans ce laps de temps, mais pas avant. Nous avons ainsi calculé que le risque de SEP était 32 fois supérieur après avoir croisé le virus. De fait, la recherche d'un biomarqueur précoce de la SEP — des neurofilaments dans le sang — dont l'augmentation peut précéder jusqu'à six ans l'apparition de la maladie, indique que l'infection par l'EBV précède toujours l'apparition de ce premier indicateur biologique de la maladie. L'analyse fine des résultats nous a permis d'estimer à cinq ans en moyenne le délai entre cette infection et les premiers symptômes de la SEP. Surtout, nous avons pu montrer que ce lien n'existe pas avec d'autres virus. Il est spécifique à l'EBV. Je suis ainsi convaincu qu'un vaccin efficace, qui empêcherait l'infection, permettrait d'éviter la grande majorité des cas de sclérose en plaques.”

Propos recueillis par H. J.

de la santé américains (National Institutes of Health) qui se lançaient par la voix de leur désormais ex-directeur Anthony Fauci : « *Un vaccin prévenant l'infection par le virus Epstein-Barr pourrait réduire l'incidence de la mononucléose infectieuse mais aussi l'incidence des tumeurs malignes associées et certaines maladies auto-immunes* ». En mars dernier, le géant américain Merck (MSD) a passé un accord avec la biotech ModeX Therapeutics pour accompagner le développement du candidat-vaccin MDX 2201, encore en phase préclinique lui. Enfin, en avril, c'est une société allemande, EBViously, issue du centre de recherche Helmholtz de Munich qui présentait son candidat-vaccin non encore testé cliniquement.

Le mimétisme moléculaire incite à rester prudent

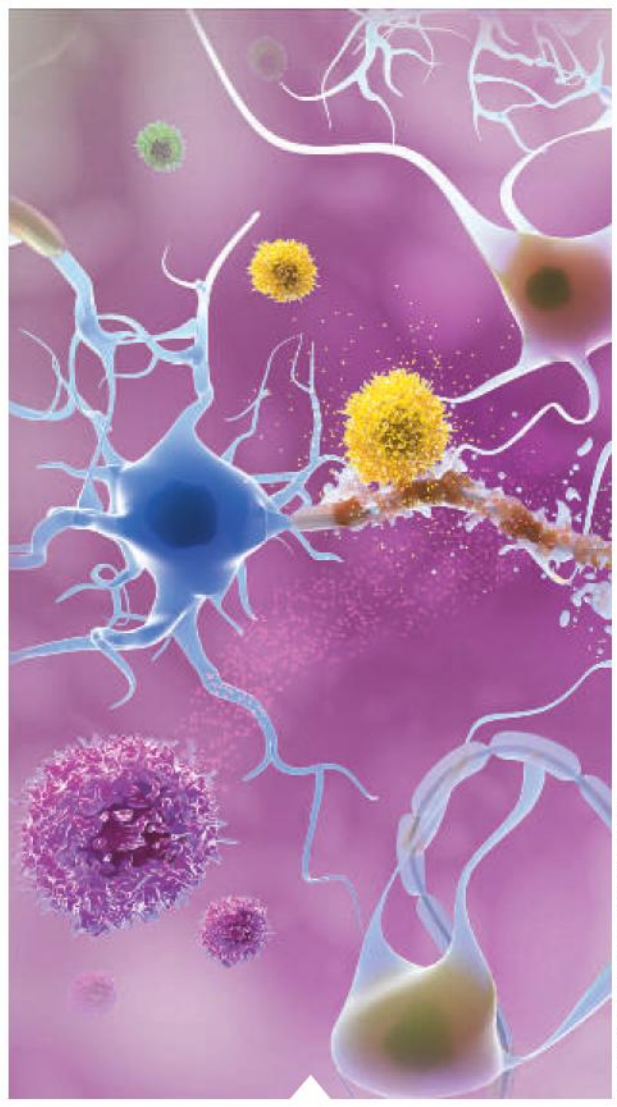
« *La mise au point d'un vaccin ciblant les jeunes adultes non encore infectés par l'EBV pourrait être déterminante dans la prévention de la sclérose en plaques* », juge Évelyne Manet. Mais attention : comme pour les Coxsackies B et le diabète, intervenir sur le système immunitaire fragilisé de patients prédisposés n'est pas sans risque. Administrés durant la prime enfance, « *ces vaccins pourraient en théorie retarder les infections à EBV jusqu'à l'adolescence, lorsqu'elles sont plus susceptibles de provoquer une mononucléose infectieuse ou de contribuer à la SEP* », avertit Peter Calabresi, professeur de neurologie à l'université Johns-Hopkins (États-Unis). Par ailleurs, « *si c'est la réponse du système immunitaire contre l'EBV qui déclenche la SEP, une attention particulière serait nécessaire à la conception de ces vaccins, pour s'assurer qu'ils ne favorisent pas précisément le type de réponse immune à l'origine de la maladie qu'on souhaite empêcher.* » C'est à nouveau le principe de mimétisme moléculaire auquel il faut être particulièrement vigilant. D'autant que dans le cas de la sclérose en plaques, ce mécanisme déclencheur de l'auto-immunité a été récemment mis en lumière par une étude dans *Nature*. À partir du liquide cérébrospinal de patients atteints de SEP, les chercheurs ont isolé un clone de lymphocytes B, des cellules immunitaires, produisant un anticorps monoclonal qui reconnaît une partie spécifique d'une protéine de l'EBV. Or celui-ci réagit de manière croisée avec la molécule d'adhérence cellulaire gliale (GlialCAM) exprimée par la myéline dans le système nerveux central. Autrement dit, le même anticorps est programmé pour s'attaquer aussi bien au virus qu'à la gaine de myéline entourant les neurones.

Jusqu'ici toutefois, « *aucun des essais précliniques ou cliniques menés sur les vaccins n'a fait apparaître ce type de réactions* », rassure Roberto Mallone. Quoi qu'il en soit, il faudrait donc des vaccins particulièrement efficaces, suffisamment neutralisants pour empêcher l'entrée du virus dans les tissus les plus à risques de voir l'immunité détraquée par l'infection. Au vu des premiers essais, l'espoir de voir la fréquence de ces maladies diminuer grâce à une vaccination est encore permis. ■

PROPHYLAXIE

Le succès de la lutte contre les virus oncogènes

Le fait que des maladies auto-immunes puissent débuter par une infection virale n'est pas sans rappeler l'estimation établie à environ 15 % du nombre de cancers dans le monde dus à des virus oncogènes. Un modèle alléchant, puisque, là où elle est massivement déployée, la vaccination contre les papillomavirus, par exemple, a conduit à un effondrement des cas de cancers. Élève modèle avec des taux de vaccination supérieur à 70 % chez les jeunes, l'Australie estime ainsi que le cancer du col de l'utérus devrait être éliminé de l'île-continent d'ici à 2035. Outre ces papillomavirus, six grandes familles virales sont susceptibles d'occasionner des lésions précancéreuses dans les tissus infectés. Et, ironie de l'histoire, le virus Epstein-Barr, aujourd'hui mis en cause dans la sclérose en plaques, fut le premier à accréditer, dès 1978, l'idée qu'un cancer humain pouvait être d'origine virale.



HUGUES DOMINIQUE HOARAU / BSIP

Sous l'action anormale des lymphocytes (rose, vert, jaune), le neurone (bleu) perd sa gaine de myéline (marron) (illustration).

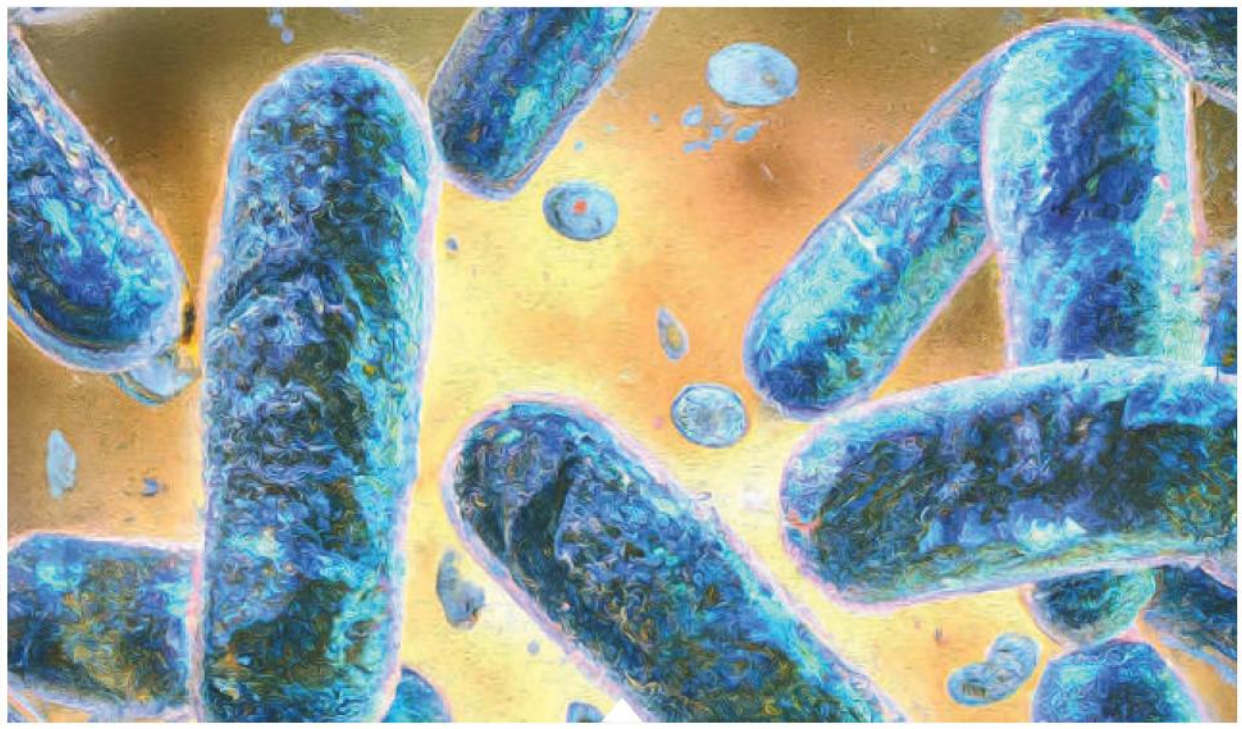
CIRI

« La mise au point d'un vaccin pourrait être déterminante dans la prévention de la sclérose en plaques »

Évelyne Manet, directrice de recherche au Centre international de recherche en infectiologie de Lyon

Modifier les bactéries pour en faire des médicaments

Ces micro-organismes entrent dans la conception des antibiotiques, de l'insuline, ou encore des hormones de croissance. Mais des chercheurs veulent aller plus loin en modifiant génétiquement les bactéries pour les utiliser comme des « médicaments vivants » qui cibleront mieux les traitements et permettront ainsi d'éviter les effets indésirables.



CHEEMENG TAN, UC DAVIS

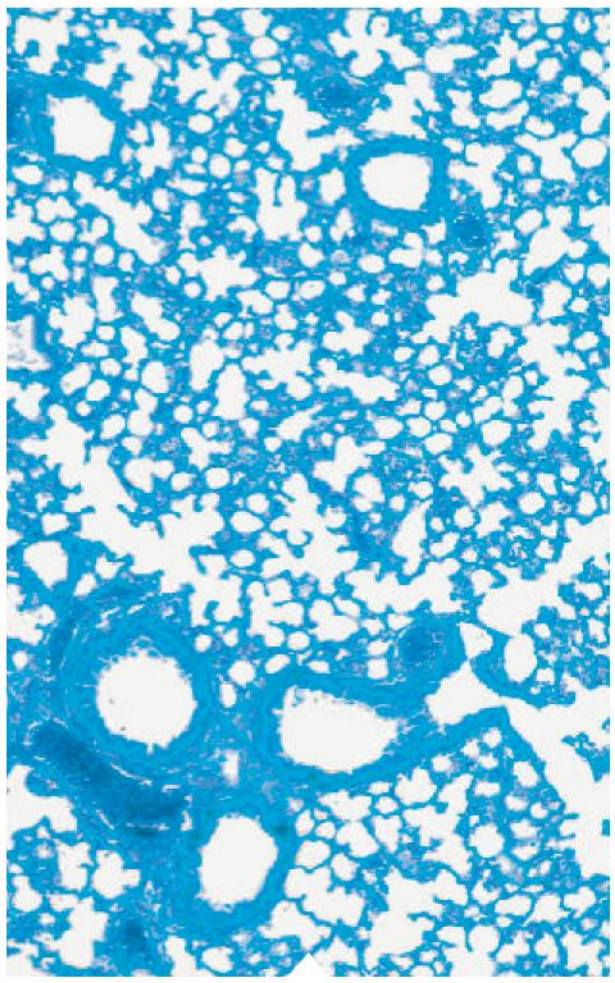
Les bactéries cyborgs de l'université de Californie (Davis, États-Unis) ont pu envahir des cellules cancéreuses « in vitro ».

À l'origine de 7,7 millions de décès en 2019, les infections bactériennes constituent la deuxième cause de mortalité dans le monde — juste derrière les troubles cardiaques. Mais avant l'apparition des antibiotiques, elles étaient probablement la principale cause de mortalité de notre espèce. Et pourtant, les bactéries comptent aussi parmi nos plus grandes alliées, de la fermentation utilisée depuis la préhistoire pour fabriquer bière, vin ou fromages jusqu'aux nombreux produits pharmaceutiques qu'elles permettent désormais de produire : insuline, anticancéreux, hormones de croissance, antibiotiques… La microbiologie a en effet appris à ▶

apprivoiser quelques espèces de ces organismes unicellulaires pour les molécules d'intérêt thérapeutique qu'elles produisent. Mais à voir l'augmentation significative des publications scientifiques en ce sens ces derniers mois, cette domestication est peut-être en passe de franchir un cap : administrer non plus des molécules produites en culture, mais des bactéries entières, modifiées pour en faire des « médicaments vivants ».

Une nanomachine sécrétant des nanocorps dans l'intestin

« *Ces bactéries modifiées ont du potentiel, car elles pourraient être utilisées pour mieux cibler le traitement et éviter ainsi des effets indésirables. Certaines équipes sont même parvenues à générer des réponses immunitaires contre des tumeurs* [lire l'encadré p. 73], s'enthousiasme Cammie Lesser, microbiologiste à l'université Harvard (États-Unis). *Sans compter les avantages économiques potentiels : ces bactéries peuvent produire directement dans le corps un médicament ou un anticorps, réduisant ainsi les coûts de fabrication.* » L'équipe de la chercheuse a pour sa part mis en pratique cette stratégie pour tenter de contrer la réaction auto-immune à l'origine de la rectocolite, une maladie inflammatoire chronique de l'intestin. La bactérie *Escherichia coli* a ainsi été modifiée pour produire des nanocorps, soit des fragments d'anticorps à domaine unique, ciblant avec une précision d'orfèvre un motif antigénique simple. Les bactéries ont de plus été équipées d'un système de sécrétion provenant d'une autre espèce, *Shigella flexneri*, pour obtenir une véritable nanomachine en forme d'aiguille qui sécrète les nanocorps dans l'environnement cellulaire, à l'intérieur des intestins. En l'occurrence, ce sont des nanocorps ciblant le facteur de nécrose tumorale alpha (TNF) qui ont été choisis. Bloquer cette protéine est en effet une approche reconnue contre des maladies auto-immunes, notamment la rectocolite. L'étude des chercheurs de Harvard, publiée en avril, montre que traiter des souris atteintes de rectocolite avec ces bactéries productrices d'anticorps était aussi efficace que le traitement standard d'anticorps monoclonaux. « *Notre but est maintenant de trouver une façon pour que ces bactéries ne puissent survivre que dans le système digestif et pas ailleurs, et qu'elles s'activent uniquement lorsqu'il y a inflammation,* indique Cammie Lesser. *Mais il y a encore beaucoup de chemin à faire.* »



ROCCO MAZZOLINI/CRG

Le tissu pulmonaire (vu au microscope) d'une souris infectée par « P. aeruginosa » est traité par une « Mycoplasma pneumoniae » modifiée.

Les utiliser contre les infections bactériennes résistantes

Outre les maladies auto-immunes, ces bactéries médicaments pourraient être utilisées plus simplement contre les infections bactériennes. Soigner le mal par le mal. C'est ce qu'a montré l'Institut de science et technologie de Barcelone (Espagne) en modifiant une bactérie normalement pathogène pour qu'elle ne s'attaque plus à l'humain, mais à d'autres bactéries pathogènes. En effet, la minuscule *Mycoplasma pneumoniae* est, en principe, à l'origine de pneumonies chez l'humain. Mais en ajoutant quatre gènes à son génome, les chercheurs lui ont donné la capacité de produire des toxines mortelles pour les *Pseudomonas aeruginosa*, une autre espèce bactérienne qui s'avère aujourd'hui résistante à un grand nombre d'antibiotiques.

Ces *Pseudomonas* sont particulièrement dangereuses pour les patients en réanimation qui ont besoin d'une assistance respiratoire. Elles forment des biofilms bactériens difficiles à nettoyer sur les sondes d'intubation endotrachéale que l'on insère dans les voies respiratoires, causant des pneumonies chez un patient en réanimation sur quatre environ. D'où l'intérêt de ces travaux présentés dans *Nature Biotechnology* en janvier, montrant que les *Mycoplasma pneumoniae* modifiées parvenaient effectivement à dissoudre les biofilms de *Pseudomonas*, ou encore à doubler le taux de survie de souris infectées par cette bactérie, sans aucune toxicité pour les poumons des rongeurs traités.

Si le potentiel semble indéniable, ces bactéries modifiées présentent tout

CAMMIE LESSER

« Ces bactéries peuvent produire directement dans le corps un médicament, réduisant ainsi les coûts de fabrication »

Cammie Lesser, microbiologiste à l'université Harvard, aux États-Unis

de même des risques qu'il faudra éliminer avant de les utiliser chez l'humain. « *Nous devons être sûrs de pouvoir nous en débarrasser quand leur travail est fini et qu'elles ne se propagent pas dans l'environnement* », prévient Cammie Lesser. Une solution pourrait être de rendre ces bactéries dépendantes à une molécule adjuvante, facile à éliminer, et sans laquelle elles ne parviendraient pas à survivre, ni dans le corps humain, ni dans l'environnement. Une autre approche serait de les rendre incapables de se reproduire. Pour ce faire, Cheemeng Tan, chercheur en génie biomédical à l'université de Californie à Davis (États-Unis), a créé des bactéries « cyborgs ». « *Nous voulions transformer les bactéries en micromachines, pour qu'elles ne puissent pas se répliquer de façon autonome, tout en conservant leurs autres fonctions* », explique Cheemeng Tan.

Leur petite taille leur permet de s'introduire presque partout

Avec son équipe, le chercheur a trouvé une façon d'empêcher la réplication des bactéries en injectant un gel fait de polymères dans leur membrane. Ce gel crée une sorte de cytosquelette qui, non seulement entoure la bactérie et l'empêche de se diviser mais, en plus, la protège. Grâce à cette barrière renforcée, ces bactéries cyborgs résistent à des concentrations normalement létales de peroxyde d'hydrogène ou à des pH en principe trop élevés pour les *E. coli* non modifiées. « *Quand on y pense, les bactéries sont des microdispositifs assez fascinants,* s'enthousiasme Cheemeng Tan. *Elles ont tant de fonctions élégantes : elles produisent des protéines et des métabolites sur demande, elles se déplacent vers des cibles… Elles ne font qu'un micromètre, et peuvent donc s'introduire presque partout.* »

Bien sûr, ces bactéries cyborgs peuvent aussi être modifiées génétiquement. Les chercheurs l'ont testé en y ajoutant le gène codant pour la protéine invasine, provenant de la bactérie *Yersinia pseudotuberculosis*. L'invasine permet à ces bactéries d'adhérer à des cellules et d'y pénétrer. Grâce à ce gène, les bactéries cyborgs ont pu envahir des cellules cancéreuses *in vitro*, montrant qu'elles pourraient être utilisées pour attaquer des tumeurs de l'intérieur. Par exemple, en produisant du stress oxydatif pour les tuer, tandis que les bactéries cyborgs, elles, résisteraient grâce à la protection de leurs cytosquelettes renforcés et pourraient ainsi poursuivre leur mission sur d'autres cellules cancéreuses.

« *Nous travaillons sur des moyens de les utiliser comme traitements thérapeutiques, en combinant par exemple plusieurs espèces pathogènes différentes, ainsi que différents matériaux,* ajoute Cheemeng Tan. *Le but est de créer de nouvelles fonctions, comme des interrupteurs pour activer ou inactiver ces micromachines et ainsi les contrôler non pas avec des gènes, mais plutôt avec des matériaux.* » Cependant, il reste encore des questions de sécurité à résoudre avant de pouvoir utiliser ces bactéries cyborgs pour des traitements. « *Nous devons analyser leurs interactions avec les cellules immunitaires. Il faudra donc encore au moins cinq ou dix ans avant de pouvoir les tester chez des humains* », reconnaît le chercheur. Modifier les bactéries génétiquement ou en les fusionnant avec des matériaux — ou les deux — devrait visiblement avoir un grand potentiel thérapeutique dans un futur proche. ■

Nicolas Gutierrez C.

ONCOLOGIE

Le rôle protecteur du microbiote cutané contre les mélanomes

En étudiant un type de bactérie qui vit sur la peau saine de chaque être humain, *Staphylococcus epidermidis*, des chercheurs de l'université Stanford (États-Unis) ont peut-être trouvé une puissante stratégie anticancer. Cette bactérie induit en effet naturellement une réponse immunitaire adaptative importante, déclenchant la production de lymphocytes T et autres cellules de défense. L'équipe a ainsi exploité cette capacité en modifiant génétiquement *Staphylococcus epidermidis* pour qu'elle exprime des antigènes spécifiques des mélanomes, des cancers graves de la peau. L'étude publiée dans *Science* montre que, lorsque ces micro-organismes modifiés colonisent la peau de souris, ils déclenchent la production de lymphocytes T qui reconnaissent et attaquent spécifiquement les cellules des mélanomes. « *Cela semblait presque magique,* s'est enthousiasmé Michael Fischbach, professeur agrégé de bio-ingénierie qui a dirigé ces travaux. *Ces souris avaient des tumeurs très agressives qui se développaient sur leur flanc, et nous leur avons donné un traitement non invasif, consistant juste à frotter un tampon de bactéries modifiées sur leur tête. Voir ces tumeurs disparaître — en particulier sur un site éloigné de l'endroit où nous avons appliqué la bactérie — était très surprenant.* » Un essai qui doit être désormais transformé chez l'humain.

Les bienfaits de la poire

Boudé par les Français, ce fruit juteux et sucré est à redécouvrir car il est peu énergétique, rafraîchissant et apporte une dose de fibres.

Angélys, conférence, Beurré Giffard… La poire originaire d'Asie mineure nous accompagne toute l'année grâce à ses nombreuses variétés. D'été (guyot, williams), d'automne (Beurré Hardy, Louise Bonne d'Avranches, etc.) et d'hiver (passe-crassane, comice…), ce fruit juteux et doux se marie aussi bien aux plats sucrés que salés et se conserve d'autant mieux qu'il continue de mûrir une fois cueilli, gardé à température ambiante. Pourtant, ce péché mignon de Louis XVI occupe, avec 4,7 kg achetés par an et par ménage, une modeste sixième place dans nos corbeilles de fruits, loin derrière la banane (13,1 kg/ménage) et la pomme (8,8 kg) (1). Il est donc temps de redécouvrir ses nombreux bénéfices nutritionnels dont on aurait tort de se priver.

La poire est légèrement sucrée…

Avec 54 kcal pour 100 g, la poire est rafraîchissante et peu énergétique car elle est composée à 84 % d'eau. Son taux de sucres varie de 8 à 11 g/100 g selon la variété et la maturité du fruit. Il s'agit en majorité de fructose (7,2 g/100 g pour la williams), suivi du saccharose et du glucose. La poire contient aussi un polyol, le sorbi-

144 000 tonnes

de poires ont été produites en France en 2022, principalement dans les régions Paca, Auvergne-Rhône-Alpes et Pays de la Loire.

SOURCE: AGRESTE.

FRUCTOSE Glucide simple que l'on trouve naturellement dans les fruits et le miel. À la différence du glucose, il est métabolisé par le foie et ne dépend pas de l'action de l'insuline.

SUCRE FERMENTESCIBLE Glucide à chaîne courte (polyols, oligo-, di- et monosaccharides) faiblement absorbé par l'intestin. Il fermente par l'action de bactéries provoquant des ballonnements, gaz et douleurs abdominales.

ALLERGIE CROISÉE Réaction survenant au contact de protéines de structures voisines mais présentes dans des substances différentes. Il existe des allergies croisées entre aliments, entre pollens, entre aliments et pollens, latex et fruits...

tol (1,89 g/100 g) au fort pouvoir sucrant (2), tandis que les acides malique et citrique (0,3 g/100 g) lui confèrent sa saveur légèrement acidulée. À noter que l'odeur typique de la poire williams est due à deux esters (éthyl (E, Z) -2,4-décadiénoate et éthyl (E, E) -2,4-décadiénoate), tandis que l'acétate d'hexyle lui donne son arôme (3).

... et peut être conseillée en cas de diabète

Le pouvoir sucrant du fructose est plus élevé que celui du sucre de table, mais son indice glycémique (IG) est bas (20 contre 100 pour le glucose). Avec un IG global de 38, la poire n'élève pas brutalement le taux de sucre dans le sang ni la sécrétion d'insuline par le pancréas. Elle peut donc être consommée par les diabétiques, d'autant que sa pulpe — et plus encore sa peau — contient des composés phénoliques, notamment des flavonoïdes (catéchine, épicatéchine, anthocyanes, quercétine, etc.) et des acides phénoliques. La consommation d'aliments riches en anthocyanes, tels que les poires, serait ainsi associée à un risque plus faible de diabète de type 2 (4). La quercétine, un flavonol (sous-groupe des flavonoïdes), est aussi connue pour ses propriétés antidiabétiques, antivirales et anti-inflammatoires (5).

C'est une bonne source de fibres

Une poire (150 g environ) fournit 4,65 g de fibres, soit près de 20 % des apports journaliers recommandés (25 g). Il s'agit pour 71 % de fibres insolubles (cellulose, hémicellulose) (6), qui préviennent la constipation en stimulant la motricité du côlon et en augmentant la fréquence des selles. Mais ces fibres peuvent aussi être source de douleurs intestinales et de ballonnements. En cas d'intestins fragiles, il vaut mieux privilégier des variétés à chair fondante (conférence, comice, guyot...) qui contiennent plus de pectine, une fibre soluble et douce.

Plus d'antioxydants avec la pelure

La poire apporte plus de fibres et d'antioxydants lorsqu'on la consomme entière. La teneur totale en composés phénoliques peut ainsi varier de 10 mg/100 g de poids frais dans la chair (conférence) à 160 mg/100 g de poids frais dans la peau (williams verte) (7). Elle apporte aussi des minéraux et contribue à la couverture de nos besoins journaliers en potassium (150 mg/100 g), impliqué dans la régulation de la tension artérielle. En quantités assez modestes sont aussi présents du phosphore (13 mg/100 g), du calcium (11 mg/100 g), du magnésium (7 mg/100 g) ou encore de la vitamine C (6 mg/100 g).

Gare aux allergies croisées

Les personnes allergiques aux pollens des bétulacées (bouleau, aulne, noisetier) peuvent développer une allergie croisée à des aliments de la famille des rosacées comme la poire, mais aussi les pommes, pêches et prunes. Consommer une poire crue (la cuisson dégrade les protéines allergènes) peut alors générer un syndrome d'allergie orale se caractérisant par des démangeaisons et des sensations transitoires de brûlure à la bouche, aux lèvres et à la gorge. ■

Sylvie Boistard @syboistard

(1) France Agrimer

(2) Table nutritionnelle Ciqual, Anses.

(3) Aroma-Active Compounds in Bartlett Pears and Their Changes during the Manufacturing Process of Bartlett Pear Brandy, Zierer B. et al, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016.

(4) Dietary flavonoid intakes and risk of type 2 diabetes in US men and women, Wedick N. M. et al, *Am J Clin Nutr.*, 2012.

(5) Health benefits of Quercetin in age-related Diseases, Deepika et al, *Molecules*, 2022.

(6) Systematic Review of Pears and Health, Reiland H. et al, *Nutrition Today*, 2015.

(7) Characterization and quantification of fruit phenolic compounds of European and Tunisian pear cultivars, Brahem M. et al, *Food Res Int.*, 2017.

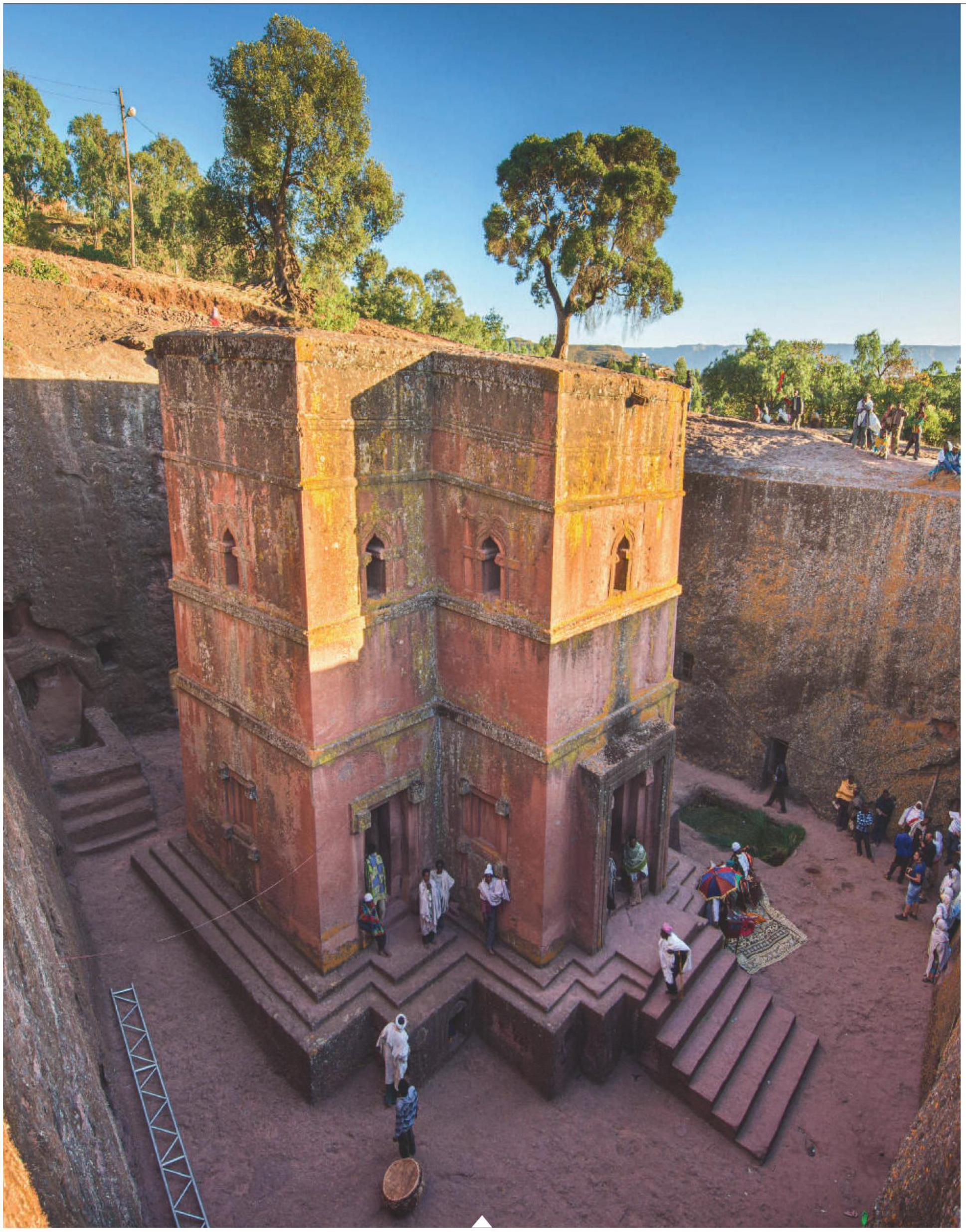
ALEXANDRA MURCIER Diététicienne nutritionniste à Paris

La préférer fraîche plutôt qu'en sirop ou séchée

« Les poires au sirop restent un dessert très sucré, le liquide de conservation étant composé de saccharose mais aussi parfois de sirop de glucose-fructose, obtenu par hydrolysation de l'amidon de maïs et néfaste pour la santé. La poire séchée concentrée en sucres (70 %) peut être consommée avant une activité sportive, mais elle ne remplace pas une portion de fruit frais. Prudence toutefois avec les intestins fragiles car le sorbitol, un sucre fermentescible, peut occasionner des troubles gastro-intestinaux. Il est d'ailleurs déconseillé en cas de régime dit sans FODMAPs*, des sucres à chaîne courte peu absorbés par l'intestin grêle. »

* Fermentable Oligosaccharides Disaccharides Monosaccharides And Polyols.

BERNARD MARTINEZ POUR SCIENCES ET AVENIR - LA RECHERCHE



ALAMY / HEMIS.FR

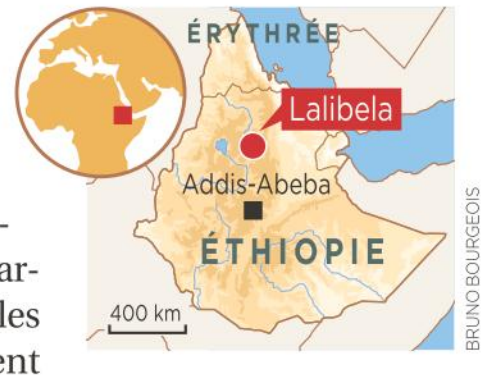
L'église Bete Giyorgis (Saint-Georges) est l'un des 11 édifices religieux creusés et taillés d'un seul bloc dans la région montagneuse de Lalibela, au nord de l'Éthiopie. Ce lieu saint recèle des traces d'occupation non religieuse antérieure au règne du roi Lalibela.

Révélations sur la Jérusalem éthiopienne

Des églises monolithes auraient été construites au XIIIe siècle à la demande du roi Lalibela pour en faire un haut lieu du christianisme orthodoxe de l'Éthiopie. Mais de nouvelles fouilles menées dans les déblais des collines alentour permettent aujourd'hui de reconstituer peu à peu l'histoire de ce site bien plus ancien qu'on ne le pensait. Reportage.

Par Marika Julien

À quelques heures de la messe de Pâques, sous un ciel étoilé, des centaines de pèlerins vêtus de blanc empruntent les ruelles pavées de Lalibela, dans le nord de l'Éthiopie, pour rejoindre l'église Bete Maryam (Sainte-Marie). Il faut assister à l'une des grandes fêtes religieuses comme Genna, le Noël éthiopien, ou Fasika (Pâques), pour saisir l'ampleur de ce que représente Lalibela pour les chrétiens de la région. Avant même d'arriver sur place, on peut entendre les chants des prêtres ; ils psalmodient en guèze, la langue liturgique de l'Église chrétienne orthodoxe éthiopienne. Pour accéder à l'édifice, on s'engouffre avec les pèlerins dans un tunnel étroit qui débouche sur une vaste cour creusée dans la roche. Au centre : l'église dédiée à la Vierge Marie. Haute de 9,5 mètres ; elle est monolithique à l'instar de toutes celles de Lalibela, taillées dans un seul bloc de pierre. Richement décorées, ses parois éclairées par quelques lampadaires et les bougies des fidèles présentent des fenêtres taillées en différentes croix : grecque, de Saint-André, et même svastika.



Les guides expliquent aux touristes que cette église fut la première creusée par le roi Lalibela, qui donna son nom à la ville. Dieu aurait demandé à ce souverain du XIIIe siècle de bâtir sur ce site vierge de toute construction une « nouvelle Jérusalem ». Cette histoire est ▶

De l'Antiquité au Moyen Âge, une région marquée par le christianisme

Ier siècle avant notre ère – VIIe siècle de notre ère Hégémonie axoumite, la cité d'Axoum située dans le Tigré actuel domine la région. Son pouvoir s'étend sur le nord de l'Éthiopie et en Érythrée ainsi que le long de la mer Rouge avec le port d'Adulis.

345 Conversion au christianisme du roi Ezana d'Axoum.

VIIe siècle Déclin d'Axoum.

XIe siècle Avènement de la dynastie zagwé dans la zone. Les Zagwé sont une famille du Lasta, la région de Lalibela.

1204 – 1225 Règne du roi Lalibela.

1270 Chute de la dynastie zagwé, avènement de la dynastie salomonienne.

tirée des *Actes du saint roi Lalibela*, un texte rédigé pas avant le XIVe siècle qui raconte l'histoire de ce roi sanctifié par l'Église chrétienne orthodoxe d'Éthiopie. Selon ces écrits, dix églises auraient été construites sur le site en vingt-trois ans seulement, les anges relayant les ouvriers la nuit pour accélérer le chantier. Une histoire battue en brèche par les découvertes les plus récentes. Une équipe de chercheurs français et éthiopiens, travaillant sur le site depuis 2009, a récemment mis au jour une structure creusée et maçonnée qui précède de deux siècles le règne du roi Lalibela ! Une découverte qui permet donc de penser que le site est bien plus ancien que l'on ne pensait. La reconstitution de son histoire a commencé par la découverte, à la fin des années 2000, de la véritable nature des collines entourant la ville. Romain Mensan, géoarchéologue indépendant et chercheur associé au Centre français des études éthiopiennes d'Addis-Abeba et au laboratoire Traces de Toulouse, a pu montrer avec son collègue géomorphologue Laurent Bruxelles, directeur de recherche CNRS au laboratoire Traces, que certaines n'étaient pas naturelles mais résultaient de l'accumulation de débris issus de la taille des églises. « *Ils ont complètement fait changer notre approche du site,* explique Marie-Laure Derat, historienne, directrice de recherche CNRS au laboratoire Orient et Méditerranée et directrice de la mission historique et archéologique de Lalibela. *Nous nous sommes dits "ce n'est pas dans les églises qu'on va trouver de l'information, mais dans les collines".* »

Les églises sont en effet relativement pauvres sur le plan archéologique. Romain Mensan parle même « *d'anti-site archéologique* ». Sur ce type de lieu façonné par creusement, on ne trouve pas grand-chose en effectuant des fouilles classiques « *parce que les bâtisseurs enlèvent de la matière. Les parties supérieures des églises sont les parties les plus anciennes* ». S'il est donc inutile de fouiller le site creusé, il en est autrement des déblais qui se sont accumulés au cours du temps pour former les collines. L'équipe de recherche a commencé par l'une des plus imposantes, qu'elle a surnommée « Qeyit Tarrara » (« montagne rouge » en amharique, la langue véhiculaire d'Éthiopie). « *Nous avons fait une coupe et nous nous sommes rendu compte qu'il y avait des niveaux de sols différents,* se souvient Marie-Laure Derat. *Ce qui appuyait notre hypothèse de différentes phases de creusement.* » La présence de céramiques en surface les a aussi incités à continuer la fouille.

Des édifices aux fonctions différentes au cours du temps

En parallèle, l'équipe s'interroge sur plusieurs « anomalies » repérées dans les églises, en particulier une porte dans la loggia de Bete Maryam et un escalier devant Bete Gebriel-Rufael qui donnent sur le vide. Elles confortent l'idée d'une construction en plusieurs étapes. « *Quand on voit l'immensité des creusements, on se dit que ça a dû se faire au cours des siècles, avec peut-être différentes fonctions au cours du temps* », pose Romain Mensan.

FOUILLES

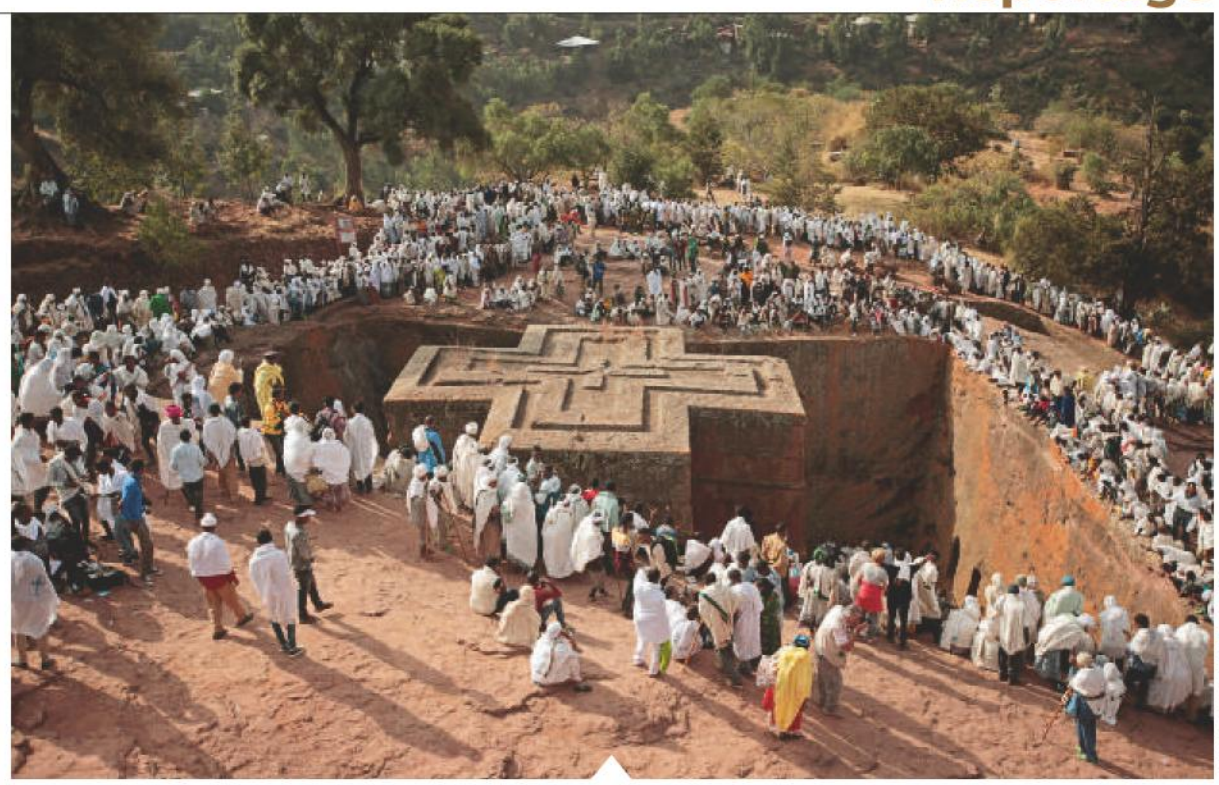
Un chantier dans une région de conflits

En 2020, le chantier de fouilles est brutalement arrêté, d'abord pour cause de Covid-19, puis en raison du conflit qui débute en novembre dans le nord du pays. Il oppose le gouvernement fédéral et ses alliés de l'époque (dont la région Amhara où se situe Lalibela) aux forces du Front de libération du peuple du Tigré (FLPT), l'ancien parti au pouvoir. Le nord de l'Éthiopie est mis à feu et à sang. La population tigréenne est la plus durement touchée. Mais le conflit déborde aussi sur les régions voisines. Lalibela est occupée de juillet à décembre 2021 par les forces du FLPT. Un accord de cessation des hostilités est conclu en novembre 2022. Dès que la situation s'est stabilisée, les chercheurs sont revenus. La fouille a pu reprendre fin 2022 et, en mai de cette année, près de 300 personnes travaillaient sur le projet Sustainable Lalibela. Mais début août, la situation s'est de nouveau embrasée dans la région, des miliciens nationalistes amhara s'opposant à l'armée gouvernementale. Si, pour l'instant, les artisans locaux continuent de travailler sur le chantier, le futur est incertain.

En 2017, Marie-Laure Derat obtient un financement de l'Agence nationale pour la recherche qui permet d'embaucher une vingtaine d'ouvriers. *« Ces sondages sur Qeyit Tarrara nous ont confirmé que nous avions eu raison d'ouvrir ici,* se souvient-elle. *Nous étions sur des structures plus anciennes que le site des églises que l'on attribue au minimum au règne du roi Lalibela au début du XIIIe siècle.* » Après une longue pause forcée de plusieurs mois causée par le conflit ravageant le nord de l'Éthiopie *(lire l'encadré ci-contre)*, la fouille a pu reprendre en mai 2022.

Des preuves de présence humaine avant le XIIIe siècle

Une grande structure circulaire de près de 11 mètres de diamètre est entièrement mise au jour. Cette construction, creusée et maçonnée, pourrait être une installation hydraulique permettant d'utiliser la force de l'eau pour broyer du grain ou tout simplement drainer de l'eau vers des réservoirs. Pour étayer cette hypothèse, Romain Mensan s'appuie sur la présence de plusieurs tranchées creusées tout autour des églises. Certaines sont antérieures aux édifices religieux. Il existe d'ailleurs une citerne en dessous de l'église de Gebriel-Rufael, encore accessible aujourd'hui grâce à des ouvertures situées au fond de la tranchée de près de 11 mètres qu'il faut franchir pour entrer dans l'édifice. Le géomorphologue précise que *« le site archéologique de Lalibela est situé dans une zone où il n'y a pas du tout d'eau et où le seul potentiel aquifère, ce sont les eaux de pluies. Il faut pouvoir les collecter… »* Sur l'ensemble de cette grosse structure possiblement « hydraulique » de Qeyit Tarrara, les datations obtenues situent un mur entre le milieu du Xe siècle et le milieu du XIe siècle. Puis la première construction circulaire entre le XIe et le début du XIIe siècle. Autour, les archéologues ont retrouvé des ossements, témoignant d'une consommation de viande, des foyers, beaucoup de céramique et d'autres éléments faisant penser à de l'artisanat… Rien de très religieux. *« La*



MARIKA JULIEN / REUTERS

Les pélerins orthodoxes assistent à une messe de l'église Bete Giyorgis la veille du Noël éthiopien, le 6 janvier 2018.

MARIKA JULIEN

Au centre culturel de Lalibela, où a lieu une exposition permanente sur le site, une assistante conservatrice étudie un tryptique entré récemment dans les collections.

MARIKA JULIEN

Cette structure circulaire, probablement hydraulique, a été récemment découverte sur la colline « Qeyit Tarrara » et remonterait aux Xe-XIIe siècles.

CONSERVATION

L'Éthiopie et la France associées pour valoriser le site

Le chantier archéologique fait partie du projet global Sustainable Lalibela, un projet de restauration, conservation et valorisation du site financé en majorité par l'Agence française de développement et le CNRS. Parmi ses différents volets, les interventions d'urgence. À la tête de cette mission se trouve Antoine Garric, tailleur de pierre et assistant ingénieur au CNRS. Après avoir travaillé de nombreuses années à Karnak en Égypte, il s'est installé en Éthiopie où il a formé une trentaine de personnes à de nouvelles techniques de taille pour sécuriser et valoriser le site de Lalibela. Un site qu'il connaissait déjà bien puisque depuis plusieurs années, il y venait ponctuellement en mission pour apporter son expertise aux chercheurs. Les équipes d'Antoine Garric travaillent avec la même pierre rouge que celle des églises. Une carrière a été rouverte à une quinzaine de kilomètres de la ville. Ils construisent des chemins, des ponts ou des passerelles d'accès aux édifices religieux, comme celle qui permet d'accéder à l'église de Gebriel-Rufael et qui enjambe une tranchée de près de 11 mètres de haut. Tout leur travail est validé au préalable par un conseil scientifique éthio-français. Un défi pour les équipes d'autant qu'ils interviennent sur un site vivant : « *Contrairement à Karnak, ici, il y a des messes tous les jours,* rappelle Antoine Garric. *Ce site est sacré pour les habitants de Lalibela.* »

▶ *nouveauté,* résume Marie-Laure Derat, *c'est que nous avons montré qu'il y avait une présence humaine avant le règne du roi Lalibela.* » Selon elle, la structure hydraulique allait de pair avec des espaces souterrains immenses qui correspondent aujourd'hui aux églises de Gebriel-Rufael, Bethléem et Marcoreos (situées à quelques dizaines de mètres de la structure). « *Personne, quand on entre dans ces édifices, ne se dit : "c'est une église." Ils ont été transformés en églises… On peut dire que vers le XIIe, le XIe siècle, peut être même avant, des creusements ont été réalisés pour créer des salles souterraines. Ensuite ces salles sont aménagées, soit pour l'artisanat, soit pour une occupation domestique.* » Selon la chercheuse, cette occupation précoce implique la présence d'une élite. Car pour construire de telles structures et réaliser les premiers creusements, il fallait pouvoir rassembler des ouvriers en nombre et les payer d'une manière ou d'une autre. « *Plus tard,* poursuit-elle, *ces premiers creusements évoluent. On creuse à nouveau pour faire des églises au XIIIe siècle.* » À cette époque, selon plusieurs sources, le roi Lalibela a eu un rôle important. Des autels de bois comportent des dédicaces du roi indiquant qu'il offre ces objets aux églises. Marie-Laure Derat a récemment étudié un évangéliaire (manuscrit liturgique) contenant la note : « *Moi le roi Lalibela, j'ai donné ces terres à l'église de Bete Medhane Alem* » (la plus vaste des églises de la cité).

SUSTAINABLE LALIBELA

« Ces édifices ont été transformés en églises au XIIIe siècle »

Marie-Laure Derat, directrice de la mission historique et archéologique de Lalibela

Le site a fait l'objet de remaniements réguliers

L'occupation du site et les premiers creusements dateraient donc au moins du XIe siècle… Deux siècles avant le règne du roi Lalibela (autour de 1204-1225). Le monarque bâtisseur aurait ensuite bien eu un rôle au XIIIe siècle sans qu'il soit définitif puisque la conservation différenciée des églises et des « styles » variés poussent les chercheurs à penser que Bete Giyorgis (Saint-Georges) au moins est un peu postérieure au XIIIe siècle. Ensuite, le site a régulièrement été remanié.

Une exposition « Lalibela, sculpter la foi », prévue dans le cadre du projet de recherche, dévoile au public le site de Lalibela et les découvertes récentes. Inaugurée à Addis-Abeba, elle a été installée à Lalibela en juin dernier de façon permanente. La présentation des découvertes récentes est une tâche parfois compliquée : « *On ne touche pas à la religion,* avertit Kidane Woldegiorgis Ayalew, le manager du projet Sustainable Lalibela qui chapeaute les fouilles et la restauration du site. *Nous écrirons par exemple : la recherche dit ceci et l'Église dit cela… Mais il est impossible d'écrire que les anges n'ont pas construit les églises. Nous nous contenterons d'indiquer que le roi Lalibela a été impliqué dans la construction de tel ou tel monument.* »

Pendant ce temps, les recherches se poursuivent. Romain Mensan a décidé de mieux comprendre le réseau de tranchées qui découpent le site. Disparues sous une épaisse couche de sédiments, elles pourraient être la clé pour comprendre la structure mise au jour par les chercheurs et les origines de l'un des sites les plus fascinants d'Éthiopie. ■

REJOIGNEZ **LE PREMIER PÔLE SCIENTIFIQUE** DE LA PRESSE FRANÇAISE

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

LE MENSUEL

LE HORS-SÉRIE

UNE VISION COMPLÈTE DE LA SCIENCE

Chaque mois, toute l'actualité scientifique, dans un langage accessible.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur sciencesetavenir.fr

UNE INFORMATION THÉMATIQUE CLAIRE ET VIVANTE

Chaque trimestre, une thématique étudiée sous tous ses aspects, en compagnie des plus grands spécialistes.

39 JOURNALISTES PASSIONNÉS

19 PARUTIONS PAR AN

2,5 MILLIONS DE LECTEURS

2,6 MILLIONS DE SOCIO-NAUTES

7,3 MILLIONS DE VISITEURS SUR LE SITE

3 APPLICATIONS IOS/ANDROID

2 SITES POUR DES INFOS EXCLUSIVES

La Recherche

LE TRIMESTRIEL

LA RÉFÉRENCE INCONTOURNABLE

Chaque trimestre, un panorama complet en 150 pages de la recherche scientifique.

Retrouvez toutes nos offres d'abonnement sur larecherche.fr

TOUTE L'ACTUALITE SCIENTIFIQUE QUOTIDIENNE

2 sites au service de l'actualité scientifique, de la plus accessible à la plus innovante. **Des articles quotidiens** pour être à la pointe de la science.

Vos questions en direct aux chercheurs sur notre chaîne Twitch https://www.twitch.tv/sciencesetavenir/

plus de 2,2 millions de fans !

plus de 160 000 followers

plus de 163 000 instagrammeurs

Plus de 7 000 abonnés professionnels

plus de 17 000 abonnés

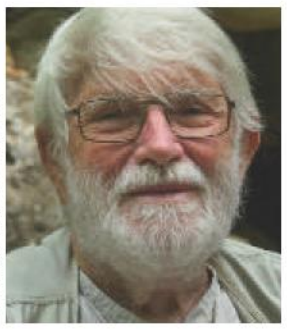
PROMINT-SCAV2

Neandertal, artiste malgré lui

Dans la grotte de la Roche-Cotard (Indre-et-Loire), des gravures pariétales datées de plus de 57 000 ans viennent d'être attribuées à Neandertal. Discutables pour un certain nombre de chercheurs, ces conclusions relancent le débat sur les supposés talents d'artiste de notre lointain cousin.

Le titre de la publication est sans équivoque : « Des gravures rupestres attribuées à Neandertal sont les plus anciennes connues — plus de 57 000 ans. » Ces « gravures rupestres » figurent sur une partie des parois de la grotte de la Roche-Cotard, à Langeais (Indre-et-Loire). Plus précisément, une série de traces de doigts qu'étudie depuis 2008 l'équipe de Jean-Claude Marquet, géologue à l'université de Tours et auteur principal de l'article paru en juin dans la revue *Plos One*. Non figuratives, évoquant au premier regard le geste d'un ou plusieurs individus qui auraient voulu « s'essuyer les mains » sur le tendre tuffeau de la grotte, ces traces seraient, selon les auteurs, *« des formes délibérées, organisées et intentionnelles créées par la main de Neandertal »*. Avec cette découverte, Jean-Claude Marquet et ses coauteurs affirment que *« le comportement et les activités des néandertaliens étaient aussi complexes et diversifiés que ceux de nos propres ancêtres »*.

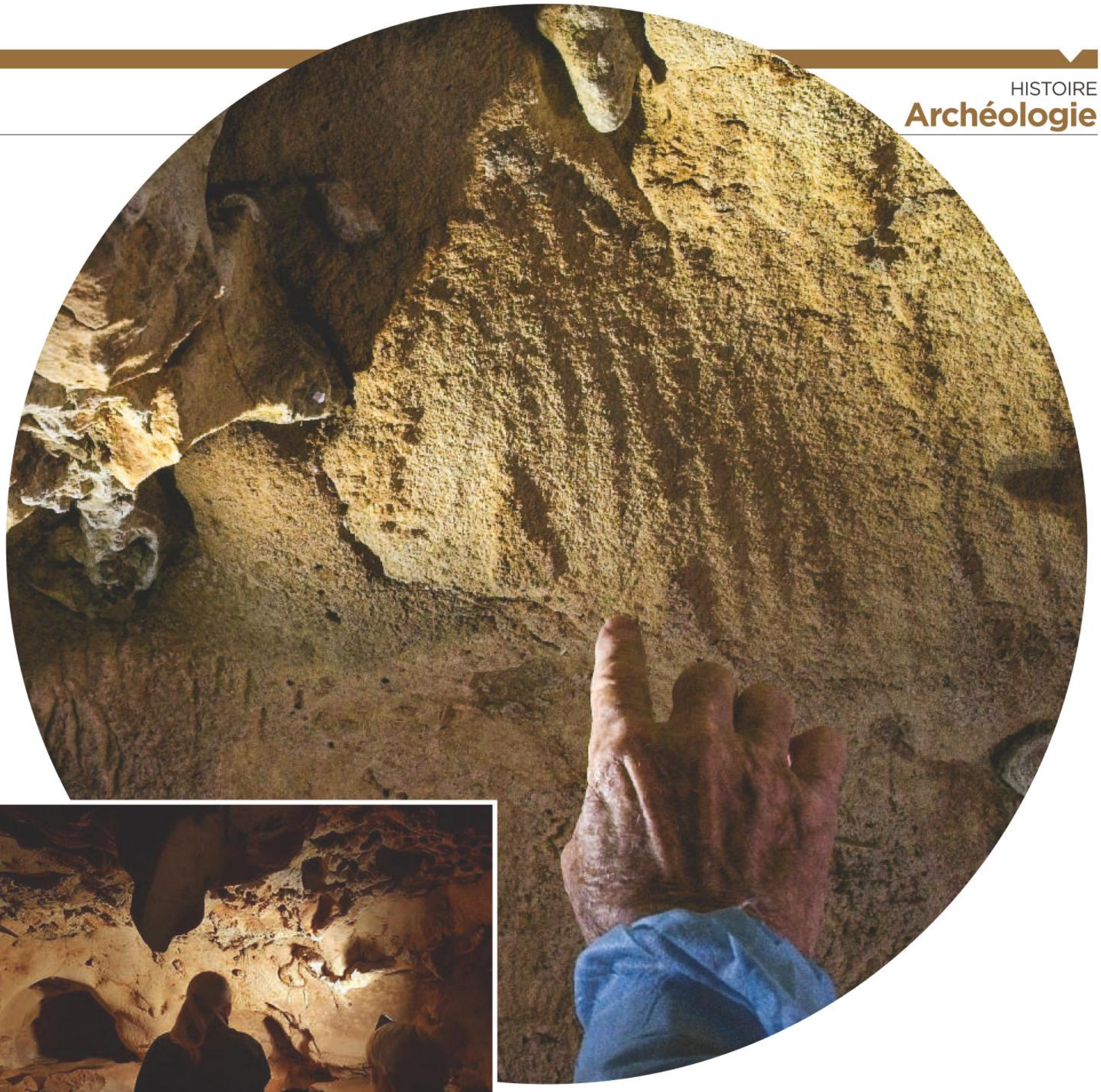
Une publication majeure qui relance donc la comparaison entre Neandertal et *H. sapiens*. Rappelons que durant près d'un siècle et demi, depuis la découverte officielle de l'espèce en 1856, les chercheurs n'ont cessé de modeler l'image d'un représentant du genre *Homo* bestial et simpliste, incapable de penser et de créer. Depuis quelques années, cette vision a évolué face des preuves matérielles, récoltées au fil des études menées sur divers sites : les néandertaliens ne peuvent être réduits à une pâle copie de nous-mêmes. Et ne peuvent surtout être compris qu'en abandonnant toute volonté d'assimilation aux comportements des *sapiens*. Dans ce contexte, que nous apprend l'étude des traces de la Roche-Cotard, intéressante à bien des égards tant les « documents graphiques » associés à Neandertal sont rares ? Que celui-ci, qui a vécu en Europe, au Moyen-Orient et en Asie centrale jusqu'il y a environ 30 000 ans, avant de disparaître pour des raisons qui nous sont encore obscures, aurait frotté la paroi de cette grotte de façon intentionnelle, sans toutefois pouvoir établir si ce geste était l'expression d'une pensée symbolique. *« Ces tracés digitaux sont tous parallèles, appliqués de*



GUILLAUME SOUVANT / AFP

« J'estime qu'on peut parler d'expression artistique. On peut même parler d'art »

Jean-Claude Marquet, géologue à l'université de Tours



JEAN-CLAUDE MARQUET/ CC-BY 4.0 - GUILLAUME SOUVANT / AFP

Les tracés digitaux ont été soigneusement réalisés sur les parois en tuffeau, une pierre calcaire tendre, et représentent des motifs non figuratifs (ci-dessus le panneau dit triangulaire).

façon soigneuse et organisée, mais ils ne représentent rien. Il ne faut pas vouloir y trouver du sens », affirme avec prudence Jean-Claude Marquet.

Une énième tentative de « réhabilitation » de Neandertal

Jusqu'ici, rien de neuf : nous savons que Neandertal est en capacité, dans ses sphères techniques et artisanales, d'enchaînements de gestes infiniment plus complexes, planifiés et raisonnés que ce que montrent ces frottements de paroi. On peut notamment citer le motif en zigzag gravé sur un os retrouvé sur le site du paléolithique moyen de Bacho Kiro, en Bulgarie. C'est avec les tracés de la Roche-Cotard que Jean-Claude Marquet s'aventure sur un terrain qu'il sait dangereux : « *J'estime qu'on peut parler d'expression artistique. On peut même parler d'art, puisque Picasso a dit à Miró que toute trace sur une surface était de l'art. Mais j'ai conscience que nous n'allons pas mettre tout le monde d'accord.* »

Le géologue avait vu juste. Interrogé par *Sciences et Avenir*, le spécialiste de Neandertal Ludovic Slimak, chercheur CNRS à l'université Toulouse-Paul-Sabatier — qui n'a pas participé à l'étude —, regrette que ces travaux consistent en partie en une énième tentative de « *réhabilitation de Neandertal, alors même que Neandertal n'a pas besoin d'être réinventé. Tenter de prouver qu'il était comme nous est une forme de piège mental, ces raclements de doigts ne pouvant nous conduire à une appréhension raisonnée de ces humanités anciennes.* »

La dernière phrase de l'étude, dans laquelle les auteurs assurent qu'il n'y a pas de « *différence évidente en termes de*

DÉCOUVERTE

Un habitat moustérien

Découverte en 1846 lors de l'exploitation d'une carrière, cette petite grotte formée de quatre salles distinctes fut véritablement explorée pour la première fois en 1912. À l'intérieur furent trouvés des ossements de faune sauvage, restes de repas d'homininés et d'hyènes et quelques artefacts lithiques moustériens, une industrie correspondant à la période du paléolithique moyen (-350 000 à -35 000 ans), qui permit notamment de faire le lien avec une occupation néandertalienne probable. Un bloc de silex découvert en 1977 lors d'un sondage stratigraphique fit particulièrement couler de l'encre : le « masque moustérien » de la Roche-Cotard, une pierre taillée ressemblant vaguement à un visage et dans laquelle fut emboîté un petit os. Elle est considérée comme l'une des premières manifestations artistiques attribuées à Neandertal, mais sa nature et sa fonction sont encore débattues.

THILO PARG, CC BY - SA 4.0

Le « masque » de la Roche-Cotard est un silex taillé d'environ 10 cm de large et 10 cm de haut.

comportements sociaux organisés entre Neandertal et les sapiens *contemporains* », ne fait d'ailleurs que souligner ce biais de pensée. Et Ludovic Slimak de rappeler : *« Nous pourrions tout aussi bien signifier que des tracés d'un même ordre de complexité — et donc de complexité et de signifiant très limités en réalité — ont été récemment proposés pour les grottes de Rising Star en Afrique du Sud, pour un âge compris entre 241 000 ans et 335 000 ans, incomparablement plus ancien que ce qui est présenté ici, mais surtout associé à des homininés présentant de très faibles capacités cérébrales. Évidemment, l'étude en préprint* [c'est-à-dire non encore scientifiquement validée] *de Rising Star présente ses propres fragilités, tout comme l'étude de la Roche-Cotard, tant il est toujours délicat d'aborder la date de fermeture totale d'une cavité alors que celle-ci a souffert d'ouvertures dès 1846 par des travaux de carriers. »* *(Lire l'encadré ci-dessus.)*

Même son de cloche du côté de Gilles Tosello, préhistorien spécialiste de l'art paléolithique et chercheur au Creap (Centre de recherche et d'étude pour l'art préhistorique Émilie-Cartailhac) : *« La longueur de l'étude laisse d'emblée entendre qu'il s'agit là d'une démonstration difficile. Nous sommes une fois de plus dans le registre de la "réhabilitation" de Neandertal, qui se fait à marche forcée et qui dure depuis 40 ans, autrement dit depuis bien trop longtemps »*, déplore le chercheur. Carole Fritz, spécialiste de l'art préhistorique et directrice scientifique de la grotte Chauvet, abonde dans le même sens : *« C'est comme si on ne pouvait concevoir que Neandertal, qui chassait, enterrait ses morts, avait sans doute un langage et fabriquait des outils, n'avait pas pu se passer de productions artistiques ou symboliques. Or, il n'en a peut-être tout simplement pas eu besoin. »*

Les premiers dessins pariétaux de ce type

Éric Robert, préhistorien et maître de conférences au Muséum national d'histoire naturelle, qui cosigne l'étude sur la Roche-Cotard, entend les critiques. *« En réalité, ce que l'on cherche ni plus ni moins à montrer, c'est qu'il y a eu démarche graphique. Une démarche d'autant plus intéressante que ces tracés digitaux sont pour l'instant un cas unique : ils sont les premiers dessins pariétaux de ce type que l'on découvre, et nous n'avons aucun référentiel avec lequel les comparer,* argumente le spécialiste. *Ce qui est certain, c'est que l'effort qui est fait pour aller construire cet ensemble de traces, pour l'organiser, n'est pas de l'ordre du hasard. Il faut en revanche faire attention à ce que nous allons y projeter, car lorsqu'il y a dimension esthétique, cela renvoie forcément à des composantes que nous allons appeler "art" aujourd'hui. J'estime, pour ma part, que ce raisonnement est inadapté pour appréhender ce que représente ce type de tracé. »* On l'aura compris, au sein même de l'équipe de chercheurs, le débat se poursuit. ■ **Marine Benoit**

@Marine_Eben

DU 22 AU 30 NOV. 2023

CROISIÈRE SUR le Nil

A bord du MS KAHILA *****

Louxor - Esna - Kôm Ombo - Assouan
Le Caire et son nouveau Musée

9 JOURS / 8 NUITS

A PARTIR DE **2 790 €/PERS. EN TOUT INCLUS** (1)

AVEC LA PARTICIPATION DE (2)
PASCAL VERNUS, Egyptologue
CHRISTIAN GRATALOUP, Géohistorien
YASMINE FOUAD, Ministre de l'environnement
DOMINIQUE LEGLU, Directrice éditoriale de SCIENCES et AVENIR

MAGIQUE EGYPTE

Amis de Sciences et Avenir et de La Recherche, songez que, du haut de ces pyramides, quarante siècles d'histoire vous contempleront ! Il n'est même pas besoin de paraphraser la déclaration de Bonaparte à ses soldats pour rappeler la fascination que la civilisation égyptienne continue d'exercer sur notre imaginaire.

Hiéroglyphes, Champollion, momies, Kheops, Toutankhamon, Akhenaton, Nefertiti... tous ces noms continuent d'avoir pour nous une résonance fabuleuse.

Le voyage de huit jours à l'automne 2023 - en compagnie de deux scientifiques français exceptionnels que les lecteurs de Sciences et Avenir - La Recherche connaissent bien, l'égyptologue **Pascal Vernus** et le géo-historien **Christian Grataloup** - permettra de découvrir (ou redécouvrir) les pyramides de Gizeh et le Sphinx, mais aussi le grand musée du Caire. Ce plus vaste musée d'égyptologie au monde abritera désormais les joyaux telles la collection complète du trésor de Toutankhamon, l'immense barque solaire du pharaon Kheops et pas moins de 100.000 antiquités traduisant l'imaginaire envoûtant des Egyptiens, toujours à la conquête de l'immortalité. A partir de Louxor, nous aurons ensuite le plaisir de voguer pendant quatre jours sur ce fleuve nourricier qu'est le Nil, dont les crues ont été la clé du développement de cette civilisation dans une zone aride. Et pourrons visiter des lieux aussi mythiques que la vallée des Rois, le temple de Hatchepsout mais aussi Abou Simbel, dont le sauvetage des deux temples fut la plus grande opération archéologique du XXe siècle. **Embarquez donc avec nous pour un voyage qui promet des moments magiques !**

Dr Dominique Leglu
Directrice éditoriale de Sciences et Avenir - La Recherche, pôle Sciences du groupe Challenges.

UN ÉVÈNEMENT EXCLUSIF

SCIENCES ET AVENIR La Recherche

Retrouvez tous les détails de ce voyage exceptionnel sur www.sa-egypte.fr
Renseignements | Tél. 01 84 76 22 35 | collection-infini@mycomm.fr

(1) Voir détails sur la brochure (2) Sous réserve de disponibilité

SARL Mycomm - 40 avenue Raspail - 94250 Gentilly • Immatriculation Atout France IM094100035 • Assurances Professionnelles by Hiscox - Tourisme Pro n° RCE1006 et n° RC1006-PJ0116 • Agence garantie par l'APST • RCS 510 368 400

Les modules photovoltaïques en verre du toit du marché de Béjar, à Salamanque (Espagne), génèrent près de 9000 kilowattheures par an.

Cinq questions pour

Comprendre les révolutions du verre dans nos vies

Des carrosseries de voiture aux implants dentaires et immeubles de demain, le verre s'invite dans tous les pans de notre vie. Jusqu'à devenir l'une des clés des révolutions technologiques et transitions environnementales à venir.

Par Régis de Closets, avec Agence Forum News

1 Comment fabrique-t-on du « verre intelligent » ?

Depuis l'Antiquité, la recette de base de fabrication du verre reste inchangée (de la silice, fusion de quartz ou de sable à très haute température). Pourtant, elle n'a eu de cesse de s'enrichir pour améliorer les performances et adapter le matériau à des secteurs toujours plus variés. Par exemple, les carrosseries de voitures ou pales d'éoliennes sont de plus en plus fabriquées avec des fibres de verre, résistantes et moins coûteuses que le carbone. Les batteries des voitures électriques seront peut-être bientôt aussi en verre. Le chercheur japonais Hironobu Minowa, de l'entreprise high-tech NTT, en a en effet développé une capable d'assurer jusqu'à 1600 km d'autonomie pour 60 secondes de charge ! Quant à nos écrans tactiles, ils deviendront dans quelques années pliants, fabriqués avec des verres moins épais que les cheveux.

Cette amélioration continue passe aussi par la technique dite du verre par couches qui permet d'ajouter sur le verre des strates de composants invisibles à l'œil nu mais qui augmentent ses propriétés : pour résister aux égratignures ou aux flammes, pour chasser des reflets indésirables ou devenir hydrophobes. Les vitres de nos abribus ou pare-brise intègrent ainsi une fine couche de plastique qui limite la dispersion des éclats en cas de choc. Certains vitrages d'immeubles deviennent autonettoyants grâce à l'apport de dioxyde de titane qui dégrade une partie des polluants atmosphériques.

2 Pourquoi peut-il nous protéger du réchauffement climatique ?

Si les verres destinés à l'habitation ont longtemps privilégié l'esthétique, les nouveaux verres intelligents optimisent leurs propriétés isolantes. Les vitrages dits dynamiques modulent leurs teintes en fonction de la luminosité extérieure pour garder les pièces fraîches ou chaudes. Aux États-Unis, le gouvernement vient de lancer un grand plan d'équipement pour les bâtiments neufs. D'autres innovations isolantes sont attendues comme les vitres enrichies d'aérogel de silice, un composant 37 fois plus isolant que la laine de verre, et surtout les vitrages photovoltaïques capables non seulement de filtrer les rayonnements de chaleur (UV et infrarouges) mais surtout de les transformer en électricité verte. Équipés de ▶

ONYX SOLAR

30 kg Le volume moyen de verre recyclé annuellement par les Français. **50 %** La diminution moyenne du poids d'une bouteille en verre au cours du dernier siècle. **420 g** L'objectif de poids d'une bouteille de vin en 2024 (500 à 750 g aujourd'hui).

SOURCES : ADEME - ONG SWRAT

Télomères et longévité

En 2009, trois chercheurs américains se sont vu décerner le Prix Nobel de Médecine pour leurs travaux exceptionnels en biologie et génétique, qui ont permis la compréhension des mécanismes de protection de l'ADN au cœur des cellules.

Genèse d'une découverte

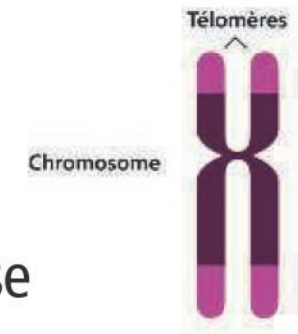
Le mot télomère vient du grec telos (fin) et meros (partie).

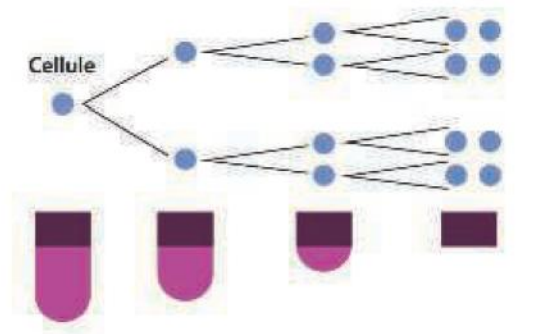
Dans les années 80, Elizabeth Blackburn est professeur de biologie à l'Université de Californie. Elle collabore avec Carol Greider, professeur de biologie moléculaire et Jack Szostak, professeur de génétique, afin d'étudier les mécanismes de protection et de réparation des chromosomes lors de la mitose cellulaire. Leurs travaux cherchent à expliquer comment les divisions cellulaires successives peuvent s'enchaîner sans que les chromosomes ne fusionnent entre eux ou ne s'abiment.

Mitose cellulaire et réplication des chromosomes

Les cellules de l'organisme se reproduisent régulièrement par un processus de division appelé mitose, la cellule initiale se scindant en deux cellules filles identiques qui contiennent le même matériel génétique. Il se produit pas moins de deux trillions de mitoses dans le corps humain chaque jour, ce qui permet de remplacer les cellules mortes ou abimées. Ce grand nombre fait supposer la survenue d'erreurs, c'est pourquoi les chercheurs ont émis l'hypothèse d'un système de protection des chromosomes.

Deux découvertes en une : télomères et télomérase





Les télomères raccourcissent à chaque division cellulaire

Situés aux extrémités de chaque chromosome, les télomères jouent un rôle de protection au moment de la séparation du matériel génétique. En effet à chaque division, ils raccourcissent légèrement, « sacrifiant » leur intégrité pour protéger celle des chromosomes. Le raccourcissement progressif des télomères finit par provoquer la mort de la cellule, appelée sénescence. Les trois scientifiques ont également identifié une enzyme, baptisée télomérase, capable de rallonger les télomères et donc de prolonger la vie des cellules. Ils ont remarqué que cette enzyme n'était active que dans les cellules souches et germinales. Plus le nombre de de cellules sénescentes est grand, plus le vieillissement de l'organisme accélère : la longévité est donc directement liée à la longueur des télomères.

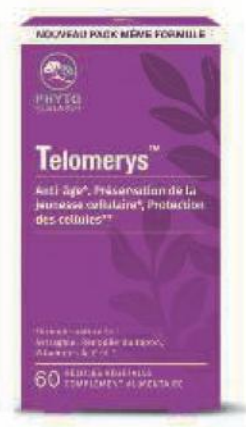
Astragale et télomères,

Des scientifiques se sont intéressés à la racine de l'Astragalus membranaceus, une petite fleur très utilisée en médecine traditionnelle comme tonifiant et immunostimulant. Ils ont mis en évidence que ses propriétés étaient dues à deux composés, appelés cycloastragenol et astragaloside IV, qui avaient la capacité de réactiver la télomérase dans les cellules. Après plusieurs années de développement, le laboratoire français PhytoResearch a mis au point une formule naturelle basée sur les résultats de ces avancées scientifi ques. Telomerys associe un extrait concentré de racine d'Astragalus membranaceus à du resvératrol, un puissant antioxydant, ainsi que des vitamines A, C et E. Formule anti-âge inédite, deux gélules par jour suffi sent pour constater une diminution signifi cative des rides, une amélioration des fonctions cognitives (mémoire, concentration) et un regain d'énergie.

Des conseils ?

Les experts du Laboratoire PhytoResearch sont à votre écoute au **01 84 20 63 50** et sur www.telomerys.com

Telomerys™ :
Préservation de la jeunesse cellulaire



Disponible en pharmacie

Telomerys 60 gélules végétales est disponible grâce au code ACL 602 42 56

AVIS D'EXPERT

HUGUES JACQUET*
SOCIOLOGUE

« Réussir la décarbonation de sa production »

Comment l'usage du verre s'est-il développé au fil des siècles ?
Si le verre apparaît 4000 ans avant J.-C., l'emploi du verre creux, utilisé pour les emballages ou les flacons, s'est développé sous l'Empire romain avec l'invention du soufflage (Ier siècle avant J.-C.). Mais il faut attendre le XIXe siècle et l'arrivée du soufflage mécanique, remplaçant le souffle humain, pour assister à une vraie industrialisation. À la fin du XXe siècle, l'entreprise française ARC est l'un des principaux employeurs du nord du pays. Le verre plat en grandes dimensions, celui des vitrages, se développe plus tardivement car sa fabrication demeure quasi artisanale jusqu'à l'invention du verre flotté dans les années 1950 [on le plonge dans un bain d'étain].

En quoi constitue-t-il une alternative à l'usage grandissant du plastique ?
Le plastique est moins cher à produire, moins lourd et perçu comme plus moderne. Il représente une forte concurrence pour l'industrie du verre. Mais la transition vers une consommation plus raisonnée représente une vraie opportunité pour la filière car le verre, aux usages multiples, est recyclable infiniment. Cela suppose de réussir la décarbonation de sa production et de l'imposer comme un vrai levier de lutte contre le réchauffement climatique. ■

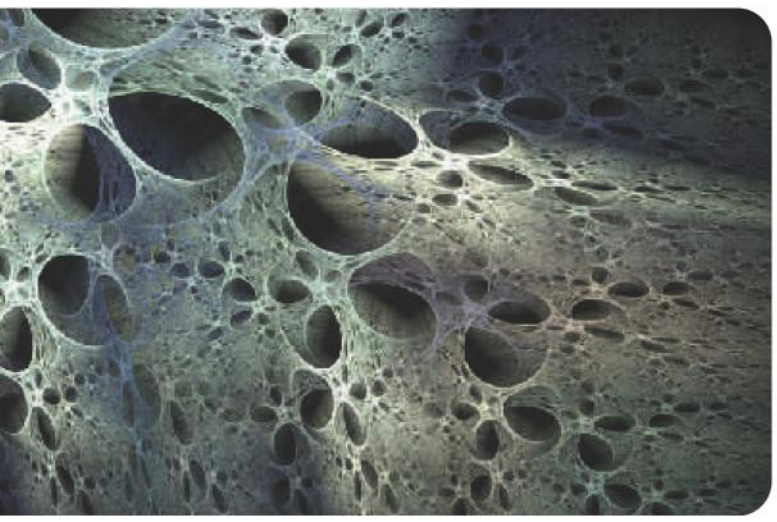
Propos recueillis par R. de C.

* Auteur de *Savoir et faire : le verre*, Actes Sud, 2022.

SP

cellules photovoltaïques nanométriques, ces vitrages peuvent convertir en électricité jusqu'à 10 % des rayonnements absorbés, trois fois plus que les premiers modèles datant de 2020 ! « *Les performances s'améliorent vite et l'on voit déjà de premiers prototypes capables de produire de l'électricité sur une face et de la stocker comme une batterie sur l'autre* », témoigne Daniel Neuville, directeur de recherche au CNRS, responsable de l'équipe géomatériaux à l'Institut de physique du globe, à Paris.

3 Va-t-il permettre des avancées médicales ?



SP

Plus de 10 millions de patients dans le monde ont déjà bénéficié des propriétés des verres bioactifs *(photo ci-dessus)* inventés dans les années 1970 par le chercheur américain Larry Hench. Capable de se dégrader naturellement dans le corps humain, ce verre est appliqué sur des os fracturés ou malades qui ne peuvent se reconstruire seuls. Il y stimule la production de cellules osseuses (grâce aux minéraux libérés lors de la dispersion) et facilite leur « accrochage » sur les parties endommagées. « *En 6 à 10 mois, les os peuvent retrouver leur forme initiale* », explique Céline Saint Olive Baque, à la tête de Noraker, spécialiste mondial de ces matériaux. Utilisés fréquemment dans la chirurgie du rachis ou pour les implants dentaires, ces verres bioactifs pourraient servir demain également à la reconstruction de tissus mous et cartilages (en particulier pour éviter la mise en place de prothèses de genou).

4 Comment évoluent les verres des lunettes ?

Ce sont nos verres les plus familiers. Pourtant ils portent mal leur nom car les verres correcteurs des lunettes ne sont quasiment plus fabriqués avec du verre minéral depuis 50 ans ! À la place ? Un verre organique plastique, plus léger et autrement moins cassant. Il sert aujourd'hui de support à des innovations majeures destinées à prévenir et corriger nos pathologies visuelles. À l'image des nouvelles gammes de verres de prévention de la myopie qui limitent chez l'enfant l'allongement de l'œil, à l'origine de cette maladie. Une récente étude de l'Inserm et de l'université de Californie (États-Unis) a également attesté de l'effet correcteur des filtres commercialisés contre le daltonisme. Filtrant les longueurs d'onde à la frontière entre le rouge et le vert (là où les gammes chromatiques se confondent le plus), ils permettent de rééduquer la vision et de récupérer une vue corrigée — sans que l'on sache combien de temps peut perdurer l'effet correcteur.

5 Le verre est-il une ressource durable ?

Certes, le matériau peut être recyclé à l'infini et la filière du verre d'emballage affiche un taux de recyclage de plus de 80 %. Mais le réemploi des vitrages ou écrans reste bien en deçà, d'autant que les déchets doivent subir une décontamination avant recyclage. 90 % des fenêtres finissent toujours en enfouissement. La décarbonation de la chaîne de production s'annonce plus complexe encore. Fabriquer du verre demeure très énergivore, avec des fours qui chauffent à 1500 °C pour assurer la fusion. L'électrification commence à se mettre en place : Saint-Gobain a sorti l'an passé son premier verre zéro carbone. ■

72H POUR DÉCOUVRIR ET PRÉSERVER LES TRÉSORS DE NOTRE PLANÈTE BLEUE

LE FESTIVAL

GRAND OCEAN

29-30 SEPT. | 1ER OCT. 2023

À LA CITÉ DE LA MER, CHERBOURG-EN-COTENTIN

À OMONVILLE-LA-ROGUE

& EN DIGITAL

Conférences & débats portés par les plus grands spécialistes, animations ludiques & immersives... nous accueillons petits et grands pour une plongée unique au cœur des océans.

www.grandocean-event.com

Partenaires Officiels

Partenaires Associés

Partenaires

Partenaires Médias

Organisé par

TRANSVERSALES

SOMMAIRE

▶ C'est à lire
p. 90

▶ C'est à voir
p. 92

▶ Le ciel du mois
p. 93

▶ Chroniques
p. 94

▶ Questions de lecteurs
p. 96

▶ Solutions des jeux
p. 97

▶ Jeux
p. 98

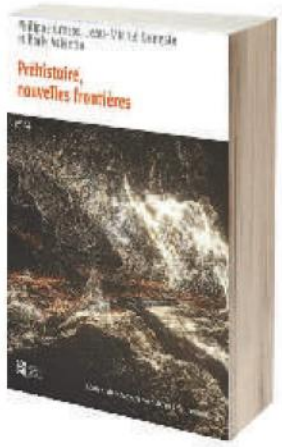
MINISTÈRE DE LA CULTURE/CENTRE NATIONAL DE LA PRÉHISTOIRE/NORBERT AUJOULAT

« La grande vache noire », une des figures emblématiques de la grotte de Lascaux, en Dordogne.

Repenser la préhistoire

Un ouvrage collectif ambitieux dresse le bilan des avancées de la préhistoire tout en proposant de changer notre regard sur cette discipline au carrefour de nombreuses sciences.

DÉCONSTRUCTION La préhistoire est jeune : deux petits siècles au compteur d'une discipline dynamique, que ce livre propose de repenser, à commencer par son nom, réducteur et utilitaire. Pourquoi ne pas parler d'histoire des commencements et récuser l'une des césures couramment acceptées entre préhistoire et histoire, l'usage de l'écriture ? Pourquoi ne pas se référer à des paléolithiques et des néolithiques pluriels, plus pertinents à l'égard de la multiplicité des réalités sondées par l'archéologie préhistorique ? On martèle ici que cette science trouve sa complétude dans les interactions interdisciplinaires, en particulier avec les sciences humaines, et engendre d'inédites visions dès lors qu'elle s'ouvre aux altérités géographiques et franchit les frontières du temps, des symboliques, des techniques, à l'intérieur desquelles on l'a confinée.

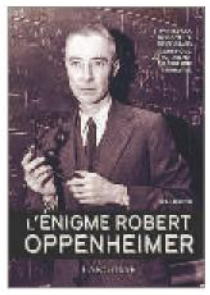


Sortir de l'Europe, appréhender d'autres usages des outils, d'autres organisations de sociétés humaines, d'autres imaginaires… « *Regarder d'autres lointains* » en somme, mieux cohabiter avec les autres vivants, d'après Jean-Michel Geneste, codirecteur de l'ouvrage. Une cinquantaine de contributeurs — philosophes, anthropologues, historiens, artistes, écologues, dirigés par un brillant trio de spécialistes — nourrit cette excitante œuvre de déconstruction de la codification temporelle, analyse les avancées techniques, les apports de la multidisciplinarité, et l'évolution des modes de transmission des connaissances. Car l'engouement pour ce que l'on nommera encore ici la préhistoire emmène aussi à réinventer le partage des savoirs. ■ **Andreina De Bei**

Préhistoire, nouvelles frontières, sous la direction de Jean-Michel Geneste, Philippe Grosos et Boris Valentin, Éditions de la Maison de sciences de l'homme, 468 p., 25 €

Un savant controversé

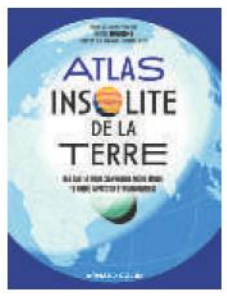
PORTRAIT Qui était Robert Oppenheimer, un des savants qui a le plus nourri l'imaginaire collectif, directeur scientifique du projet Manhattan de 1943 à 1945 ? Cette biographie explore les multiples facettes de cette personnalité complexe et tourmentée, à la fois dandy intellectuel et brillant théoricien, qui participa au développement de la mécanique quantique avant de rallier de grands physiciens de son époque à la fabrication de la première arme atomique. Il s'est élevé, selon l'auteur, *« au rang d'un mythe américain, quelque part entre Faust et Prométhée, Frankenstein et Œdipe »*. **F. D.**



L'Énigme Robert Oppenheimer, Ivan Kiriow, Larousse, 270 p., 15,95 €

Chemins de traverse

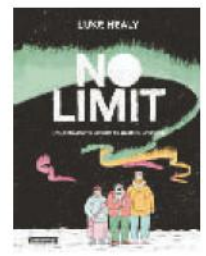
CARTOGRAPHIE Vous avez toujours voulu savoir où se trouve la plus longue marche en ligne droite ou dans quel pays assister à une éclipse solaire ces dix prochaines années ? Toutes vos questions bizarres et bien d'autres trouveront leur réponse dans cet atlas très clair de 85 cartes démarrant 10 000 ans plus tôt avec l'empire des mammouths pour se conclure avec le recensement des différents animaux envoyés dans l'espace. Une large part est consacrée à l'environnement et à l'état de la planète. **H. R.**



Atlas insolite de la Terre, Mike Higgins, Armand Colin, 192 p., 21,90 €

Maudit Grand Nord

BD L'ethnologue et explorateur canadien Vilhjalmur Stefansson a mené deux expéditions scientifiques maudites, en 1913 et 1921. La première, à la recherche de nouveaux territoires dans l'Arctique, tourne court avec le naufrage du bateau et la perte de la quasi-totalité de l'équipage. De la seconde, une tentative de colonisation de l'île Wrangel en 1921, ne survivront qu'un chat et une jeune Inuit. Dans cette BD au graphisme simple, le récit de ces deux fiascos croise celui, fictif, d'un universitaire mis à l'écart professionnellement, pour aborder les questions de l'isolement et de la survie en milieu hostile. **S. R.**



No Limit, Luke Healy, Casterman, 196 p., 25 €

Elon Musk avant l'heure

AMBITION Projet Wotan retrace la stupéfiante histoire de Lutz Kayser (1939-2017). Cet ingénieur ouest-allemand, visionnaire de l'aérospatiale, aspirait à rendre l'espace accessible aux acteurs privés grâce à sa société Otrag. Une sorte d'Elon Musk avant l'heure ! Kayser a tenté d'implanter des sites de lancement au Zaïre et en Libye dans les années 1970, s'alliant à des dirigeants controversés comme Mobutu et Kadhafi. Bien que l'Otrag ait disparu en 1987, la vision de Kayser a contribué à façonner le paysage actuel de l'exploration spatiale commerciale. **O. L.**

Projet Wotan, Joëlle Stolz, Seuil, 272 p., 21 €

Les écrans et le numérique, nouvelle panique morale

MYTHE Les écrans causent l'inculture des adolescents. Apprendre en s'amusant est une illusion. Les jeux vidéo nuisent à la santé physique et psychique des jeunes. Le numérique fait diminuer leur intelligence. Chacune de ces accusations — et d'autres, régulièrement relayées dans les médias — fait l'objet d'un chapitre de cet essai collectif, coordonné par deux chercheuses en sciences de l'information et de la communication et en psychologie cognitive. Les effets supposés nocifs des écrans sont confrontés à ce qu'en dit vraiment la littérature scientifique et aux preuves qu'elle apporte. Ou pas. Sans angélisme — il existe des usages problématiques du numérique —, l'ouvrage établit que les méfaits des « écrans » relèvent surtout d'une panique morale, soit une réaction disproportionnée face à des pratiques jugées déviantes. La télévision, les *comics*, les jeux de rôle, les jeux vidéo mais aussi le flipper dans les années 1930 ont autant déchaîné les passions que le numérique aujourd'hui. ■ **Arnaud Devillard**

Les Enfants et les Écrans, coordonné par Anne Cordier et Séverine Erhel, éditions Retz, 176 p., 9,90 €

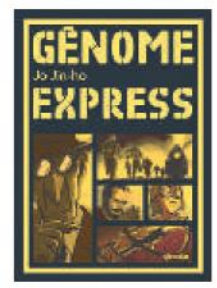
Sur l'âpre sentier des escargots

EXTINCTION Philosophe de l'environnement expert des extinctions d'espèces, Thom van Dooren livre une série d'histoires saisissantes sur les traces des gastéropodes d'Hawaii. Un site d'exception abritant autrefois plus de 750 espèces d'escargots terrestres, dont les deux tiers ont disparu. À travers forêts, musées, laboratoires et même un centre d'entraînement militaire, la piste baveuse retraçant leur déclin se révèle pleine d'aventures pour ces animaux dont le charisme évolutif ne saute pas aux yeux avant la lecture. **H. J.**

Tout un monde dans une coquille, Thom van Dooren, Les Empêcheurs de tourner en rond, 384 p., 22 €

Voyage au cœur du génome

BD Pour expliquer la génétique, l'auteur coréen remonte d'abord aux sources du concept de gène. De Thomas Morgan à Charles Darwin en passant par le moine Mendel, il rencontre au gré de son voyage les grands noms de la discipline, jusqu'à ce que la star se dévoile enfin : l'ADN. Et le voyage reprend de plus belle. La narration se fait parfois moléculaire, plongeant au niveau de la double hélice pour expliquer des concepts rendus très clairs par le dessin de Jo Jin-ho. À la fin, le gène et le génome vous paraîtront beaucoup moins étrangers. **H. R.**



Génome Express, Jo Jin-ho, Éditions çà et là, 430 p., 26 €

C'EST À VOIR

Épinal (88)

Plein la vue
Cette exposition déploie quatre sections consacrées aux effets d'optique : illusion de profondeur, jeu d'ombres, ambiguïté, images mouvantes. Elles présentent un ensemble d'objets historiques des XVIIIe et XIXe siècles.
Musée de l'image, 42, quai de Dogneville, jusqu'au 7 janvier 2024. Rens.: 03.29.81.48.30.

Lillebonne (76)

Qui es-tu Apollon ?
L'espace du musée a été réaménagé temporairement pour se consacrer à la figure du dieu Apollon, « de Juliobona à la culture pop ». Cinq zones thématiques traitent autant de dimensions, dont la face sombre, moins connue, de cette divinité.
Musée Juliobona, place Félix-Faure, jusqu'au 30 novembre. Rens. : 02.35.95.90.13.

Mont-Saint-Michel (50)

La demeure de l'archange
L'exposition célèbre le millénaire de l'église abbatiale. Objets d'arts et documents évoquent son histoire comme son architecture et son chantier de construction.
Abbaye du Mont-Saint-Michel, jusqu'au 5 novembre. Rens. : 02.33.89.80.00.

Paris (75)

Trésors médiévaux du Victoria and Albert Museum
Ces 70 objets d'exception (chandelier, ciboire, sculptures…) datent d'une époque où le français était la langue de la cour d'Angleterre. Ils témoignent des liens culturels et politiques étroits entre l'île et le continent.
Hôtel de la Marine, 2, place de la Concorde, jusqu'au 22 octobre. Rens. : www.hotel-de-la-marine.paris

Strasbourg (67)

Nouveau planétarium
L'université de Strasbourg a ouvert ce nouvel équipement début juillet. Fort de 138 places, il programme des séances d'une heure comprenant un film et une présentation du ciel étoilé sur un écran de 15 m de diamètre.
Jardin des Sciences, 27, boulevard de la Victoire. Rens. : 03.68.85.24.50.

Verdun (55)

Destins de Verdun
Né d'une série de posts sur les réseaux sociaux, ce parcours retrace vingt destins individuels que la bataille de Verdun a bouleversés. Textes, photos et sons font le lien entre les histoires humaines et le terrain.
Mémorial de Verdun, 1, avenue du Corps européen, Fleury-devant-Douaumont, jusqu'au 28 avril 2024. Rens. : 03.29.88.19.16.

Draguignan (83) / Exposition

Trésors du royaume de Lotharingie

La préciosité des pièces présentées comme leur rareté rendent cette exposition exceptionnelle. Ces 190 objets datant d'avant l'an mille mettent en lumière toute la beauté d'une période quasi légendaire de l'histoire de France : la « Renaissance carolingienne », et plus précisément « lotharingienne », du nom de l'empire hérité par le petit-fils de Charlemagne, Lothaire Ier, à la mort de son père Louis le Pieux. Le terme de Lotharingie désigne un territoire qui s'étendait de la mer du Nord à la Méditerranée en passant par les vallées du Rhin et du Rhône. Il vit fleurir autour des années 850 nombre d'artisans et d'artistes hors pair qui firent la splendeur du règne carolingien dans son ensemble. Et pour cause : participant d'une forme de retour à l'antique, ces derniers sont mis au service de la royauté. Ils sont également installés dans les ateliers des églises, appelés *scriptoria*. Ainsi naissent les scribes, dont nous hériterons de nombreux ouvrages d'une infinie délicatesse et qui ont la part belle dans l'exposition. Voir notre diaporama : sciav.fr/919caro ■ **Marine Benoit**

BERGEN MUSEUM, UNIVERSITY OF BERGEN

Applique anthropomorphe de Myklebostad, Irlande (VIIIe-IXe siècles).

Hôtel départemental des expositions du Var, 1, boulevard Maréchal-Foch, jusqu'au 8 octobre. Rens. : 04.83.95.34.08.

FESTIVAL

Marseille (13)

Allez Savoir : Voyage en utopies
Cette 4e édition explore l'idée de société idéale et à venir, formulée de diverses manières selon les époques (Renaissance, Lumières) voire repoussée (XXe siècle). Conférences, visites, expositions se déroulent en une douzaine de lieux patrimoniaux.
Centre de la Vieille Charité, 2, rue de la Charité, du 20 au 24 septembre. Rens. : www.allez-savoir.fr/festival

PARTENARIAT SCIENCES AVENIR

Rouen (76)

Nautilus, la Seine, l'océan
Dans le cadre du festival Nautil'Art, avec notamment une exposition artistique dans la Halle aux Toiles du 2 au 17 septembre, deux jours de conférences font le lien entre réflexions scientifiques, écologiques, patrimoniales et artistiques sur les enjeux de la Seine et de l'océan.
Pavillon des transitions, quai de Boisguilbert, les 8 et 9 septembre. Programme : https://linktr.ee/nautilart

Scannez ce QR code et retrouvez toutes les expositions dans notre guide

LE CIEL DE SEPTEMBRE

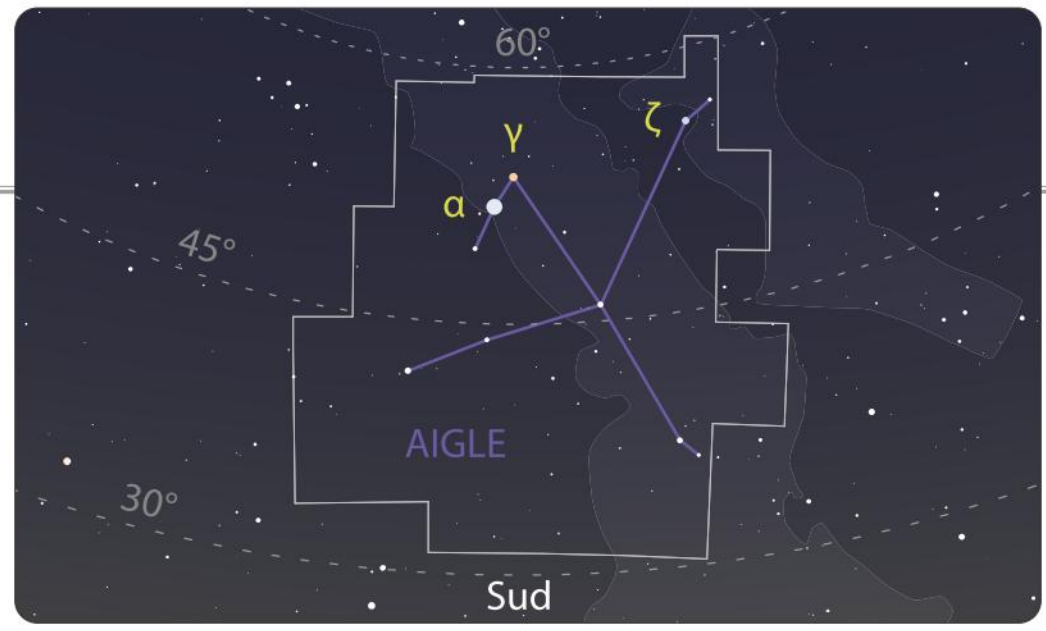
PAR JOHAN KIEKEN

Où sont les planètes ?

MERCURE La petite planète passe en conjonction inférieure le 6. Elle s'éloigne ensuite de la direction du Soleil et c'est le 22 qu'elle atteindra sa distance angulaire maximale (18°) à l'ouest de l'astre du jour. Elle est observable en seconde quinzaine, bas vers l'est, dans les lueurs de l'aube.

VÉNUS Un mois après son passage en conjonction inférieure, l'étoile du Berger devient de mieux en mieux observable le matin vers l'est. Elle se lève moins de 2 heures avant le Soleil le 1er et 3 h 45 avant lui le 30. Étincelante, Vénus est immanquable dans le ciel de fin de nuit.

MARS La planète Rouge n'est pas observable ce mois, noyée dans l'éclat du couchant.



Vers 22 heures, l'Aigle se situe vers le sud à mi-hauteur dans le ciel. Ses trois étoiles principales sont Altaïr (α), Tarazed (γ) et Okab (ζ).

Sous les feux de l'Aigle divin

TRAVERSÉ PAR LA VOIE LACTÉE, l'Aigle est une constellation très ancienne. En compagnie de Véga de la Lyre et de Deneb du Cygne, son étoile principale, Altaïr, est l'un des sommets du triangle de l'été. Elle figure au 12e rang des étoiles les plus brillantes du ciel nocturne.

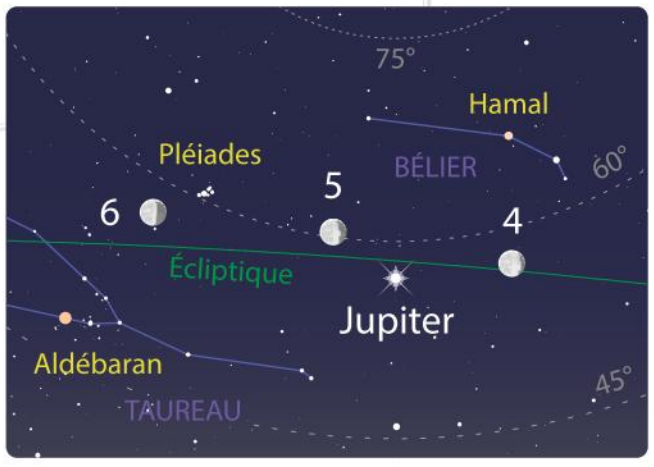
Notre conseil Même en ville, Altaïr est très facile à localiser. Tarazed, quoique six fois moins brillante, se repère assez aisément en raison de sa proximité avec Altaïr. Sous un ciel sombre, le reste de la constellation se devine de proche en proche.

JUPITER La plus grosse des planètes est visible une grande partie de la nuit. Très brillante, elle se lève en soirée et culmine à une soixantaine de degrés de hauteur en seconde moitié de nuit.

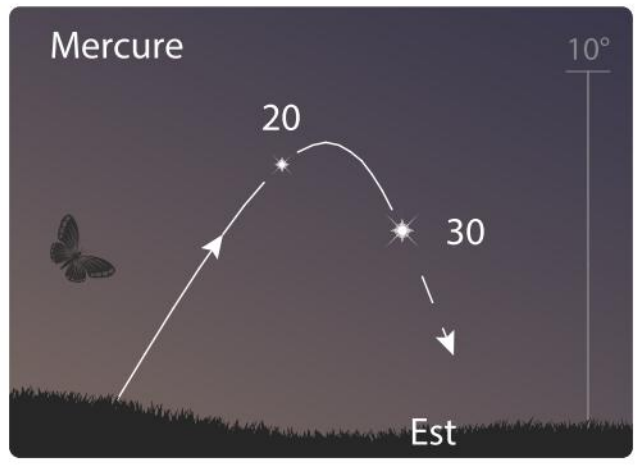
SATURNE La planète aux anneaux se trouve toujours dans d'excellentes conditions d'observation. Visible dès la fin du jour sur l'horizon sud-est, elle atteint sa hauteur maximale (environ 30°) au cœur de la nuit. On peut encore braquer sur elle un instrument d'optique pour déceler son fantastique système d'anneaux.

L'appli du mois

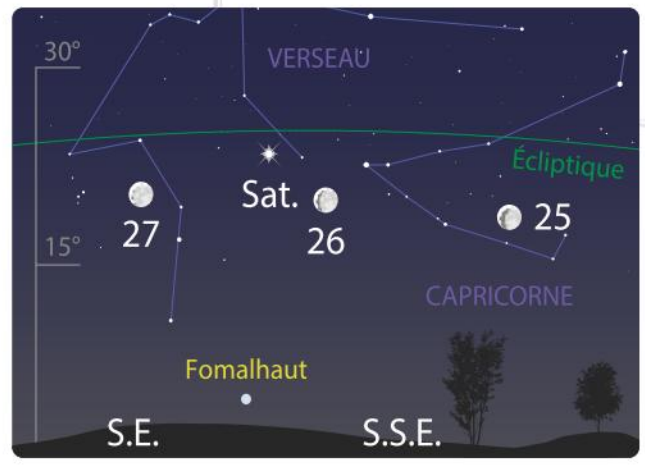
EARTH-NOW est une application gratuite en anglais éditée par la Nasa pour Android et iOS. Elle propose de visualiser les données climatiques mondiales les plus récentes et leur évolution sous la forme de cartes légendées.



DU 4 AU 6, LA LUNE EN PHASE GIBBEUSE DÉCROISSANTE passera au large de la brillante planète Jupiter. Nous sommes ici tournés vers le sud, 2 heures avant le lever du Soleil.



CHAQUE JOUR, 45 MINUTES AVANT LE LEVER DU SOLEIL, la position de Mercure est montrée ici. L'éclat de la planète gagne un facteur supérieur à deux entre le 20 et le 30 septembre.



LE 26, 2 HEURES APRÈS LE COUCHER DU SOLEIL, la Lune se trouvera à moins de 6° de Saturne, dans la constellation du Verseau. Un bon moyen pour repérer cette planète.

Scannez ce QR code pour découvrir la carte du ciel de septembre

CLIMAT PAR CÉLINE GUIVARCH ET CHRISTOPHE CASSOU

Tourisme, bons baisers d'une Terre réchauffée

Céline Guivarch, directrice de recherche à l'École des ponts, auteure principale du 6e rapport du Giec (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), groupe 3.

Christophe Cassou, directeur de recherche au CNRS, auteur principal du 6e rapport du Giec, groupe 1.

A. BILLET / UNIVERSCIENCE

C'est la rentrée ! *« Bonnes vacances ? Et tes prochaines ? »* Ce temps de reprise est l'occasion d'interroger ici les liens entre tourisme et changement climatique. Ils vont dans les deux sens : le tourisme fait partie des premiers secteurs touchés (vagues de chaleur récurrentes rendant impossibles certaines activités extérieures, risques de feux de forêt accrus imposant des réglementations strictes dans l'accès aux principaux massifs forestiers pourtant havres de fraîcheur, activités aquatiques réduites par manque d'eau dans les rivières et les lacs, etc.) ; mais le tourisme contribue aussi fortement aux émissions mondiales de gaz à effet de serre, à savoir 8 %. Sur le seul territoire français, cela fait environ 50 millions de tonnes de CO_2-équivalent, soit un peu plus de 10 % du total des émissions territoriales, auxquelles il faut ajouter 70 millions de tonnes correspondant aux transports internationaux des touristes venant de l'étranger en France. Le transport aérien représente 40 % du total, l'hébergement, les achats et la restauration 20 %. Avec 7 % du PIB et 2 millions d'emplois, les conséquences du changement climatique affectent déjà et affecteront encore davantage un pan économique essentiel. Le tourisme est autant responsable que victime du changement climatique. Il nous reste à inventer le tourisme — plus local ? plus sobre ? — d'un monde où nous aurons réussi à stabiliser le réchauffement global sous les 2 °C. Des cobénéfices se trouveront dans la préservation de la biodiversité, mais aussi celle du patrimoine culturel et des paysages que le tourisme de masse d'aujourd'hui bafoue allègrement. ■

MATHÉMATIQUES PAR SYLVIE BENZONI

Bienvenue en mathématiques

Directrice de l'institut Henri-Poincaré, à Paris.

CAMILLE CIER / HANS LUCAS

C'est la rentrée, bienvenue en mathématiques ! Une matière clivante, qui caracole en tête des moins aimées comme des matières préférées des élèves. Au titre du documentaire d'Olivier Peyon *Comment j'ai détesté les maths* (2013), on peut opposer d'innombrables raisons pour lesquelles on aime les maths, on peine à convaincre les sceptiques. La culture mathématique étant un enjeu de société, le ministère de l'Éducation nationale a lancé un « plan maths ». Bienvenue donc aux élèves de sixième ou de seconde qui auront une heure de maths en plus dans leur emploi du temps, et aux élèves de première générale qui n'ont pas choisi la spécialité maths et auront désormais 1 h 30 de maths en « tronc commun ».
Le ministère encourage de plus les clubs de maths au collège. En arrivant au club dont j'ai le plaisir d'être marraine, on peut lire « Bienvenue en mathématiques » en lettres colorées au-dessus de la porte. On entre alors dans une salle de classe pleine d'objets variés, dont les élèves peuvent s'emparer à leur guise pour manipuler, construire, jouer, réfléchir, par petits groupes de tous niveaux. Cette salle est gaie et les élèves s'y pressent avec le sourire. Peut-être connaissez-vous cette blague potache : combien faut-il de profs de maths pour faire une soustraction ? Il suffit d'un ou une seule pour faire la différence ! Alors en cette rentrée je voudrais encourager tous ces profs qui font la différence, que ce soit dans leur club de maths ou bien sûr tout simplement en classe. ■

Professeur à Sorbonne Université, à Paris, chercheur en intelligence artificielle au LIP6 (Sorbonne Université, CNRS), ex-président du comité d'éthique du CNRS. Dernier ouvrage publié : *Servitudes virtuelles*, Seuil, 2022.

ÉTHIQUE PAR JEAN-GABRIEL GANASCIA

Dévoiement de la parole publique à l'heure des robots parlants

Pour René Char, poète s'il en est, *« la parole soulève plus de terre que le fossoyeur ne le peut »* *. La lecture littérale de cet apophtegme commande de s'inquiéter de ces intarissables *chatbots* dont on affirme qu'ils parlent déjà aussi bien, si ce n'est mieux que nous. Certains d'ailleurs sonnent l'alarme. Ils craignent qu'armés de mandibules virtuelles puissantes, ces fabuleux nécrophores ne nous ensevelissent sous leurs flots verbaux. Va en ce sens la lettre ouverte parue en mars sur le site de l'Institut du futur de la vie et signée de milliers de chercheurs et d'ingénieurs ; elle propose d'instituer un moratoire pour mettre fin à l'empire des « esprits numériques » blottis dans les machines. Et il en va de même, ou presque, d'une pétition lancée en mai par des dirigeants de grandes entreprises du Web, comme Sam Altman (OpenAI) ou Demis Hassabis (DeepMind), et des scientifiques prestigieux, tels Geoffrey Hinton et Yoshua Bengio. Selon eux, l'intelligence artificielle générative contemporaine présenterait un risque majeur d'extinction de l'humanité. Mais, comment y parviendrait-elle ? Ils ne l'expliquent pas, sauf en invoquant de fugitifs esprits non humains qu'elle recèlerait en elle… N'y a-t-il pas là excès et confusions ?

La parole, au sens originel et fort, la parole qu'évoque René Char, la parole que l'on donne et qui engage, la parole qui anime, exprime la volonté, la parole souffle de l'humain ne se réduit pas au bavardage ni *a fortiori* à des suites de jetons égrenés plus ou moins au hasard. Qu'une machine en soit douée aurait de quoi effrayer. Mais il n'en est rien ! Les *chatbots* ne sont que des perroquets ; ils se contentent d'enchaîner des mots, sans leur attribuer de signification. En revanche, comment ne pas voir dans les déclarations outrancières contenues dans l'appel au moratoire et la pétition susmentionnés un dévoiement de la parole publique ! ■

BRUNO LÉVY

* *Trois respirations, in Recherche de la base et du sommet*, Œuvres complètes, la Pléiade, p. 652.

L'ŒIL DE LASCAR

Un an avant les jeux Olympiques de Paris, un essai de compétition de nage en eau libre dans la Seine a été annulé *in extremis*, en raison de la détection d'un niveau trop élevé de la bactérie *Escherichia coli* dans les dernières analyses d'eau. Cette pollution serait due à de fortes précipitations ayant provoqué le débordement des égouts et le rejet des eaux usées dans le fleuve. Ces épreuves dans la Seine représentent une introduction aux futures zones de baignade, prévues pour 2025 par la maire de Paris Anne Hidalgo sur trois sites. **O. L.**

QUESTIONS DE LECTEURS

Sur notre site **sciencesetavenir.fr,** la rédaction répond à des questions scientifiques posées par nos lecteurs sur notre page **Facebook.** En voici une sélection.

PHYSIQUE

La masse de la Terre change-t-elle ?

Lui D.

Six mille milliards de milliards de tonnes : c'est la masse estimée de la Terre. Mais elle évolue en permanence… à la baisse ! Pourtant, des poussières cosmiques ne cessent de tomber à sa surface, l'alourdissant de 40 000 t chaque année. Mais d'un autre côté, 95 000 t d'hydrogène et 1500 t d'hélium quittent la Terre dans la même période, faute d'une gravité suffisante pour les retenir. Dans une moindre mesure, l'activité du noyau central, qui agit comme un réacteur nucléaire géant, cause une perte de masse de 16 t par an. Bilan : chaque année, notre planète s'allège d'environ la moitié de la masse d'un paquebot. ■ **L. L.**

PHYSIOLOGIE

Combien de temps peut-on vivre sans manger ?

Diane D.

En 24 heures de jeûne, le corps humain épuise ses réserves de glucides. Les jours passant, ce sont celles de lipides puis de protéines qui disparaissent, entraînant une perte de la fonction cardiaque, hépatique ou rénale, et la mort. Il faudra ainsi à un homme de 70 kg un à trois mois pour mourir de faim. Mais nous ne sommes pas tous égaux. Les femmes tiendraient quelques jours de plus grâce à leur plus grande quantité de tissu adipeux. Quant aux personnes obèses, après 60 heures de jeûne, elles perdent 2,4 % de leur poids, contre 3,9 % pour les personnes maigres, les protéines se dégradant plus vite chez ces dernières. ■

Camille Gaubert @CamilleGaubertb

G. ANGOTTI-JONES/THE NEW YORK TIMES-REDUX-REA

70 % du poids des batteries devront être recyclés d'ici à 2031 en Europe.

ÉNERGIE

Peut-on facilement recycler les batteries des voitures électriques ?

Ludovic J.

Pesant environ 500 kg, les batteries représentent jusqu'à la moitié de la valeur d'un véhicule électrique neuf. Même en fin de vie, elles restent de véritables mines de matériaux précieux dont l'extraction est polluante et coûteuse. Le recyclage des batteries n'en est pas moins indispensable, car l'Agence internationale de l'énergie prévoit quelque 350 millions de voitures électriques en circulation d'ici à 2030 (contre 16,5 millions en 2021). Des filières de recyclage se sont mises en place à travers le monde ces dernières années. Cependant, il reste des freins. Beaucoup d'opérations sont encore manuelles, notamment celle qui consiste à enlever toutes les couches de plastique et aluminium jusqu'à atteindre les cellules de la batterie. Ces cellules sont ensuite réduites en poudre dont on extrait et trie les différents métaux. Le recyclage se heurte aussi à des freins d'ordre légal et économique. S'il est techniquement possible de récupérer lithium, cobalt, nickel et cuivre à plus de 90 %, les industriels ne dépasseraient pas les 60 %, selon un rapport de l'université de technologie de Sydney (Australie), qui pointe un « *manque de motivations économiques ou réglementaires* ». Mais les choses commencent à bouger : fin 2022, la Commission européenne a décidé d'imposer aux fabricants d'intégrer un minimum de matières recyclées dans les batteries à partir de 2031 (au moins 16 % de cobalt et 6 % de lithium et nickel recyclés). De plus, les industriels devront recycler au moins 70 % du poids des batteries avant 2031. ■ **Lise Loumé** @Lise_Loume

Solutions des jeux parus dans « Sciences et Avenir-La Recherche » n° 917/918, juillet-août 2023

Carré latin

8	0	3	1	4	6	9	7	2	5
3	1	0	4	6	2	5	9	7	8
5	3	8	0	1	4	7	2	6	9
1	6	4	2	7	9	3	8	5	0
0	4	1	6	2	7	8	5	9	3
6	7	2	9	5	8	1	0	3	4
2	9	7	5	8	3	4	1	0	6
7	5	9	8	3	0	6	4	1	2
9	8	5	3	0	1	2	6	4	7
4	2	6	7	9	5	0	3	8	1

Projet de voyage

MONTROUGE ne contient pas un moyen de transport, à la différence des autres :

AUBUSSON, CONCARNEAU, ESTRAMIAC, LABARRERE, SAUVETERRE, VANNES

Particularités

11 : seul nombre premier.

11 : seul nombre impair.

11 : seul nombre composé de 2 mêmes chiffres.

36 : seul carré.

20 : seul multiple de 5.

20 : seul multiple de 10.

42 : seul multiple de 7.

Citations croisées

L'histoire est une suite de mensonges sur lesquels les hommes se sont mis d'accord.

Logique de roulette

Le troisième joueur a raison.

Le premier ne peut avoir entièrement raison car, dans ce cas, le deuxième ne dit rien de juste. Le raisonnement contraire est également valable, donc ce n'est pas non plus le deuxième joueur qui a entièrement raison. Le troisième affirme que le rouge est sorti 7 fois, comme le deuxième, et le noir 5 fois, comme le premier.

Une formidable diversité

11 fois par an, l'actualité des savoirs pour tous

N° 910
La science lit dans les pensées

N° 911
Les origines de la vie

N° 912 Climat : inverser le réchauffement, c'est possible

N° 913 Fusion nucléaire : une révolution pour l'humanité

N° 914
Les clés du contrôle de soi

N° 915
Les solutions pour produire son énergie

N° 916 James-Webb : une nouvelle histoire de l'Univers

N° 917/918
Spécial Eau

Bon de commande

Je commande les numéros ci-après au prix de : 7 € par numéro payable par chèque à l'ordre de *Sciences et Avenir* (port compris pour la France).
Bon de commande à retourner à :

Sciences et Avenir
service des abonnements
45, av. du Général-Leclerc 60643 Chantilly Cedex

❑ N° 910 ❑ N° 911 ❑ N° 912 ❑ N° 913
❑ N° 914 ❑ N° 915 ❑ N° 916 ❑ N° 917/918

Nom : .....
Adresse : .....
..... Ville : .....
Code postal : .....

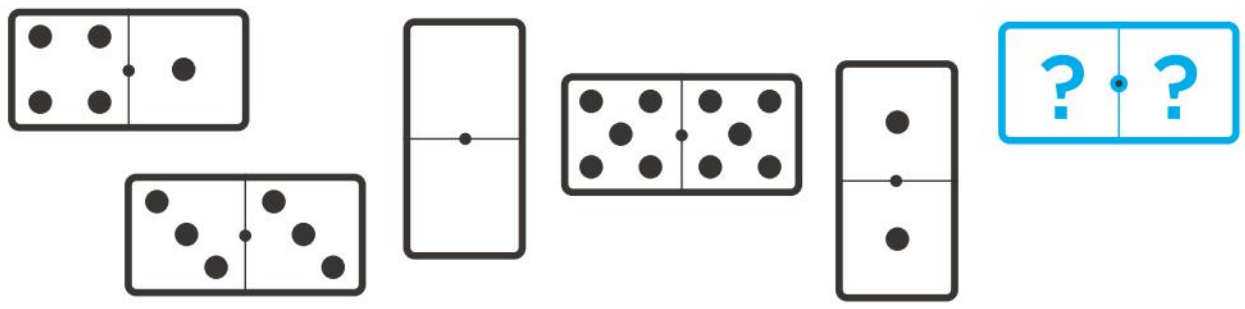
PAR PIERRE BERLOQUIN

Énigmes, logique et mathématiques

Retrouvez chaque mois des problèmes ludiques pour solliciter votre curiosité. Solutions dans le prochain numéro.

Domino en défaut

Quel domino manque dans cette collection ?



Matoku

Chaque ligne et chaque colonne comprennent des nombres de 1 à 8. Les angles sont le résultat d'un opérateur sur la zone de couleur : +, -, x, /, S pour suite (sans ordre) et M pour moyenne. Sinon, c'est le nombre.

4-		21+		S			
20x				23+			20+
6M		22+					
19+		168x				8	5M
		37+					
				S			
19+							

Logique de lettres

Dans ce carré, les lettres sont disposées suivant une certaine logique, sauf quelle erreur ?

A	X	F	S	K
B	D	U	I	P
Z	W	G	R	L
Y	E	T	J	O
C	V	H	Q	M

Anagramme

Quel dicton populaire occupe les mêmes lettres que :

Au Panama les copines des forêts sont des fées.

Auteurs, autrices ?

Oui, mais... qui ?

C'est une langue bien difficile que le français. À peine écrit-on depuis quarante ans qu'on commence à s'en apercevoir.

Ce n'est pas parce que les choses sont difficiles que nous n'osons pas, c'est parce que nous n'osons pas qu'elles sont difficiles.

Énigmes Créalude, Pierre Berloquin, Jean-Thierry Garrigues

LABORATOIRES ILAPHARM

Pour une santé chaque jour renforcée !

A vos côtés, pour votre santé !

Depuis 1992, nous vous offrons le meilleur des plantes, vitamines et minéraux, pour une santé chaque jour renforcée !

OFFRE DÉCOUVERTE dès **5€**

CODE PRIVILÈGE : **CS445**

**Offre valable 1 mois, 1 seule fois, réservée aux nouveaux clients. Non cumulable avec d'autres offres promotionnelles en cours.*

Jambes lourdes
VIGNE ROUGE BIO

Active votre circulation sanguine pour des **jambes légères et confortables**.

6€ 45 gélules

Mobilité articulaire
HARPAGOPHYTUM BIO

Conservez des **articulations souples, mobiles** et en bonne santé. *(3).*

5€ 45 gélules

Brûle-graisse
GUARANA BIO

Boostez **l'élimination des graisses et la perte de poids.** *(1), (2), (5).*

6€ 45 gélules

Libido
MACA BIO

Source d'énergie et aphrodisiaque, elle **stimule le désir sexuel.** Idéal avec le Safran.

6€ 45 comprimés

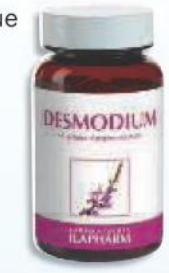
Os et articulations
SILICIUM ORGANIQUE et Vitamine C

Vitamine C (formation du collagène) et **Silicium** (constituant naturel) pour vos os et cartilages.

6€ 45 gélules

Draineur hépatique
DESMODIUM

Draineur hépatique par excellence, il favorise le **fonctionnement du foie.**



5€ 45 gélules

Prostate
HUILE DE COURGE BIO

Aide au bon fonctionnement de la **prostate** et de la **vessie**. Pour un **bon confort urinaire.**

5€ 45 capsules

Fatigue nerveuse
MAGNÉSIUM MARIN et B6

Il contribue au bon fonctionnement de votre **système nerveux.** *(6), (8).*
Allergène : ***poisson***.

5€ 45 gélules

Cholestérol
AIL NOIR BIO

Il aide au maintien d'un **taux normal de cholestérol** dans le sang. *(7).*

6€ 30 gélules

Vigueur sexuelle
SAFRAN BIO

Le Safran BIO participe au maintien de **l'érection** et **stimule le désir sexuel.** *(2), (4).*

6€ 20 gélules

Vitalité - Immunité
GINSENG SIBÉRIEN BIO

Stimulant et **énergisant**, il aide au bon fonctionnement du **système immunitaire.**

6€ 45 gélules

Foie - Draineur
ARTICHAUT - RADIS NOIR BIO

L'artichaut favorise le **fonctionnement du foie et détoxifie.**

6€ 10 ampoules ~~15,10€~~ *(1), (2), (9).*

Endurance et puissance
TRIBULUS

Il favorise le **désir**, la **capacité** et les **performances sexuelles.** *(2), (11).*

6€ 45 gélules

Sommeil
PASSIFLORE BIO

Calmante et apaisante, elle procure un **sommeil de qualité.** Ni accoutumance, ni somnolence.

6€ 45 gélules

Articulations
FRÊNE BIO

Pour le bon fonctionnement des articulations. **Gardez le plaisir de bouger !**

5€ 45 gélules

Bonne vision
SPIRULINE BIO

Préservez votre vision grâce à la **Vitamine A** issue du **Bêta-carotène** de la Spiruline. *(1), (9).*

6€ 45 comprimés

Vos 3 Cadeaux

LE DUO DE VERRES

OFFERT

Dimensions : Diamètre haut : 7,3 cm ; Diamètre base : 6,5 cm ; Hauteur : 8,5 cm. Capacité environ : 220 ml.

+

Les Frais de Port RÉDUITS au lieu de ~~6,50€~~ **2€ SEULEMENT**

+

dès **5€** **TOUS VOS PRODUITS**

EXEMPLE :

Harpagophytum BIO	5,00€
Spiruline BIO	6,00€
Huile de Courge BIO	5,00€
Safran BIO	6,00€
Maca BIO	6,00€
LE DUO DE VERRES	**OFFERT**
Frais de port	2,00€
TOTAL	30,00€

(1) Déconseillé aux enfants de moins de 12 ans. (2) Déconseillé aux femmes enceintes ou allaitantes. (3) Déconseillé en cas d'ulcère gastrique ou duodénal et de calculs biliaires. (4) Ne pas associer avec des antidépresseurs. (5) Contient de la caféine (50 mg par jour). (6) Déconseillé aux insuffisants rénaux. (7) Ne pas associer avec des anticoagulants. (8) Possible effet laxatif. (9) Déconseillé en cas de troubles de la thyroïde. (10) Espacez la prise de vos médicaments d'au moins 2 heures. (11) Déconseillé chez les enfants et adolescents, ou en cas de traitement antihypertenseur ou antidiabétique. Les éventuelles traces d'allergènes sont indiquées sur l'étiquetage des produits.

BON DE COMMANDE - COMMANDE FACILE SUR WWW.ILAPHARM.COM

Vos coordonnées ☐ M^me^ ☐ M^r^

Nom, Prénom : .....

Adresse : .....

.....

Code Postal : |_|_|_|_|_| Ville : .....

Votre date d'anniversaire : |_|_| |_|_| 19|_|_|

E-mail* : .....

pour recevoir les **Offres promotionnelles par mail d'ILAPHARM** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

de **ses partenaires** ☐ **OUI** ou ☐ **NON**

**Recommandé pour la livraison.*

Choisissez votre mode de paiement

☐ **Par carte bancaire (débit immédiat uniquement) :**

N° |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Date d'expiration : |_|_| |_|_|

Chiffres inscrits au dos de ma carte : |_|_|_|

Signature :

☐ **Par chèque, je choisis :** ○ débit immédiat ○ débit dans 1 mois à l'ordre des Laboratoires ILAPHARM

NOM DU PRODUIT	RÉF.	QTÉ	PRIX RÉDUIT	TOTAL
Vigne Rouge BIO	PVRB45		6€	
Harpagophytum BIO	PHAB45		5€	
Guarana BIO	PGUB45		6€	
Maca BIO	PMAB45		6€	
Silicium Organique et Vitamine C	PSV45		6€	
Desmodium	PDE45		5€	
Huile de Courge BIO	PPCB45		5€	
Magnésium Marin et B6	PMM45		5€	
Ail Noir BIO	PANB30		6€	
Safran BIO	PSFB20		6€	
Ginseng Sibérien BIO	PGSB45		6€	
Artichaut - Radis Noir BIO	PXRAB		6€	
Tribulus	PTR45		6€	
Passiflore BIO	PPAB45		6€	
Frêne BIO	PFNB45		5€	
Spiruline BIO	PSNB45		6€	
☐ Je reçois **gratuitement** mon **DUO DE VERRES** et mon **CATALOGUE**				**OFFERTS**
☐ Ma commande atteint 15€, **j'ajoute 2€ de frais de port**				
☐ Ma commande est inférieure à 15€, **je rajoute 6,50€**				
CODE PRIVILÈGE : **CS445**	**TOTAL À RÉGLER**			.....€

Laboratoires ILAPHARM SAS au capital de 38 112€, RCS Nanterre B 384 620 878 - 27 rue de Solférino - 92100 Boulogne. Tél Sce client 01.49.09.11.11. Offre et frais de livraison valables en France Métropolitaine. En cas d'indisponibilité de votre cadeau, nous pourrons le remplacer par un autre d'une valeur similaire. Pour recevoir votre cadeau sans commander, joignez un chèque de 6,50€ de frais, envoi sous 90 jours. Photos non contractuelles. Pour exercer les droits que vous confère le Règlement européen sur la protection des données, veuillez nous écrire, téléphoner au 01.49.09.11.11 ou consulter nos conditions générales de vente sur notre site internet. Vous bénéficiez des dispositions de la garantie légale de non-conformité et des vices cachés dont la mise en œuvre et le contenu sont prévus aux articles L. 217-4 et suivants du Code de la consommation. Vous disposez d'un délai de rétractation de 30 jours après livraison de votre commande pour retourner les produits pour remboursement ou échange sans pénalités, sauf frais de retour. Traitée dans les 24h suivant sa réception, vous recevez votre commande après 72h d'acheminement environ. Les Laboratoires ILAPHARM adhèrent à la fédération du e-commerce et de la vente à distance (FEVAD) et au service de médiation du e-commerce (BP 20015 - 75362 Paris Cedex 8 - mediateurduecommerce@fevad.com). ADEME emballages : FR202486_01JWKA, ADEME papiers : FR308139_031QWZ. Pour votre santé, mangez au moins 5 fruits et légumes par jour, consultez www.mangerbouger.fr. Conditions générales de vente : www.ilapharm.com/conditions-generales-de-vente.html Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres des Laboratoires ILAPHARM, cochez cette case ☐ ou écrivez-nous. Si vous ne souhaitez pas recevoir les offres de nos partenaires (commerciaux ou organismes) : cochez cette case ☐ ou écrivez-nous.

NOS GARANTIES :

PAYEZ DANS 1 MOIS

*Envoyez votre **réglement par chèque**, **avec votre bon de commande**, il ne sera encaissé que dans 1 mois.*

Charte Qualité fevad — synadiet — La Poste 72h

SANS ENGAGEMENT

POUR COMMANDER :

Par téléphone :

01 49 09 11 11

Du lundi au vendredi :
9h -13h et 14h -18h

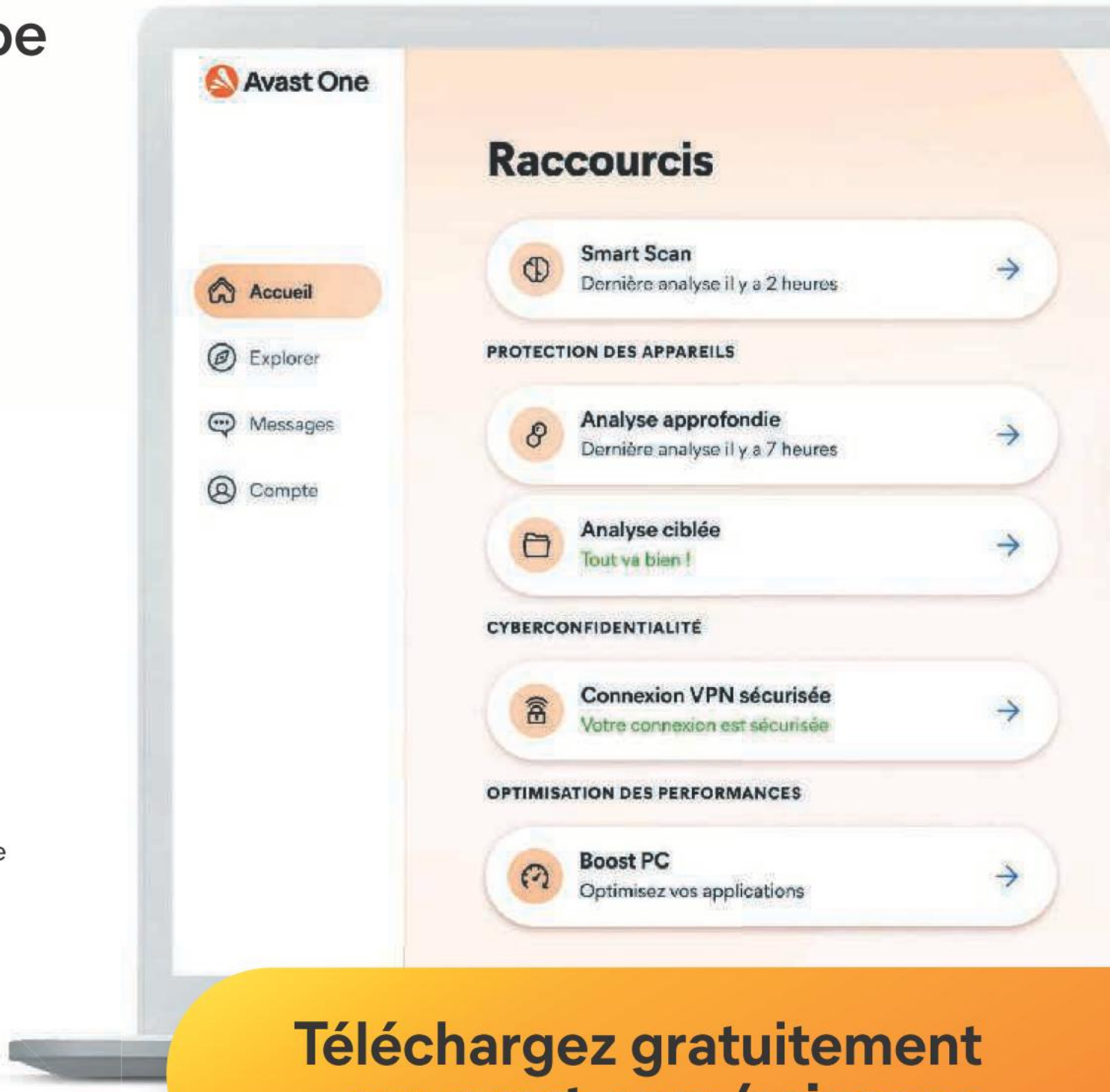
Par courrier :

Laboratoires ILAPHARM
C/O BSL - BP 60475
35171 BRUZ CEDEX

Bien plus qu'un simple antivirus

Avast One regroupe protection, confidentialité et performances.

- Bloquez virus, malwares, logiciels espions et ransomwares
- Sécurisez vos achats et transactions bancaires sur Internet
- Recevez une alerte en cas de piratage de vos comptes web
- Protégez-vous des attaques par phishing et des sites d'arnaques
- Sécurisez votre connexion et protégez votre argent avec un VPN
- Dissimulez votre position géographique
- Masquez votre adresse IP pour une confidentialité 24h/24 et 7j/7
- Accélérez, nettoyez et optimisez vos appareils



Téléchargez gratuitement sur avast.com/sciences

N'oubliez pas de protéger votre smartphone.

Téléchargez gratuitement Avast One sur mobile

presse citron
Meilleur antivirus
★★★★★

01NET
Suite hyper complète
★★★★

PC EDITORS' CHOICE PCMAG.COM
Choix de la rédaction
★★★★½

Avast One

© 2022 Copyright Avast Software